



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

**EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE ÁCIDO LÁCTICO EN JUGOS FILTRADOS PARA EL
MONITOREO DE PÉRDIDAS DE SACAROSA EN DOS TECNOLOGÍAS DE FILTRACIÓN DE
CACHAZA EN TRES INGENIOS GUATEMALTECOS**

Raisa Alejandra Vega Manzo

Asesorado por el Ing. Byron de Jesús López Maldonado

Guatemala, agosto de 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE ÁCIDO LÁCTICO EN JUGOS FILTRADOS PARA EL
MONITOREO DE PÉRDIDAS DE SACAROSA EN DOS TECNOLOGÍAS DE FILTRACIÓN DE
CACHAZA EN TRES INGENIOS GUATEMALTECOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

RAISA ALEJANDRA VEGA MANZO

ASESORADO POR EL ING. BYRON DE JESÚS LOPEZ MALDONADO

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERA QUÍMICA

GUATEMALA, AGOSTO DE 2016

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

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

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

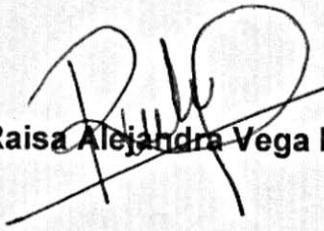
DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
EXAMINADOR	Ing. Erwin Manuel Ortiz Castillo
EXAMINADOR	Ing. Adolfo Narciso Gramajo Antonio
EXAMINADOR	Ing. Jorge Emilio Godínez Lemus
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

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:

EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE ÁCIDO LÁCTICO EN JUGOS FILTRADOS PARA EL MONITOREO DE PÉRDIDAS DE SACAROSA EN DOS TECNOLOGÍAS DE FILTRACIÓN DE CACHAZA EN TRES INGENIOS GUATEMALTECOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Química, con fecha junio de 2015.


Raisa Alejandra Vega Manzo

Guatemala, 10 de mayo de 2016

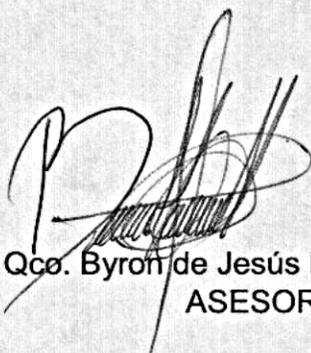
Ingeniero
Carlos Salvador Wong Davi
Director de la Escuela de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Ingeniero Wong:

Por medio de la presente HAGO CONSTAR que he revisado y dado mi aprobación al informe final de trabajo de graduación titulado "**EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE ÁCIDO LÁCTICO EN JUGOS FILTRADOS PARA EL MONITOREO DE PÉRDIDAS DE SACAROSA EN DOS TECNOLOGÍAS DE FILTRACIÓN DE CACHAZA EN TRES INGENIOS GUATEMALTECOS**", de la estudiante de Ingeniería Química Raisa Alejandra Vega Manzo quien se identifica con el carné número 2010-20288.

Sin otro particular, me suscribo de usted.

Atentamente



Byron de Jesús López Maldonado
Ingeniero Químico
Colegiado 1066

Ing. Qco. Byron de Jesús López Maldonado
ASESOR



Guatemala, 08 de junio de 2016.
 Ref. EIQ.TG-IF.032.2016.

Ingeniero
 Carlos Salvador Wong Davi
 DIRECTOR
 Escuela de Ingeniería Química
 Facultad de Ingeniería

Estimado Ingeniero Wong:

Como consta en el registro de evaluación del informe final EIQ-PRO-REG-007 correlativo **009-2015** le informo que reunidos los Miembros de la Terna nombrada por la Escuela de Ingeniería Química, se practicó la revisión del:

INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADUACIÓN

Solicitado por la estudiante universitaria: **Raisa Alejandra Vega Manzo**.
 Identificada con número de carné: **2010-20288**.
 Previo a optar al título de **INGENIERA QUÍMICA**.

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

EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE ÁCIDO LÁCTICO EN JUGOS FILTRADOS PARA EL MONITOREO DE PÉRDIDAS DE SACAROSA EN DOS TECNOLOGÍAS DE FILTRACIÓN DE CACHAZA EN TRES INGENIOS GUATEMALTECOS

El Trabajo de Graduación ha sido asesorado por el Ingeniero Químico: **Byron de Jesús López Maldonado**.

Habiendo encontrado el referido informe final del trabajo de graduación **SATISFACTORIO**, se autoriza al estudiante, proceder con los trámites requeridos de acuerdo a las normas y procedimientos establecidos por la Facultad para su autorización e impresión.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Ing. Estuardo Edmundo Monroy Benitez
 COORDINADOR DE TERNA
 Tribunal de Revisión
 Trabajo de Graduación



C.c.: archivo

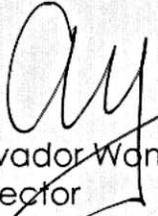




Ref.EIQ.TG.043.2016

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 de la estudiante, **RAISA ALEJANDRA VEGA MANZO** titulado: **"EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE ÁCIDO LÁCTICO EN JUGOS FILTRADOS PARA EL MONITOREO DE PÉRDIDAS DE SACAROSA EN DOS TECNOLOGÍAS DE FILTRACIÓN DE CACHAZA EN TRES INGENIOS GUATEMALTECOS"**. Procede a la autorización del mismo, ya que reúne el rigor, la secuencia, la pertinencia y la coherencia metodológica requerida.

"Id y Enseñad a Todos"


Ing. Carlos Salvador Wong Davila
Director
Escuela de Ingeniería Química



Guatemala, agosto 2016

Cc: Archivo
CSWD/ale

Universidad de San Carlos
De Guatemala

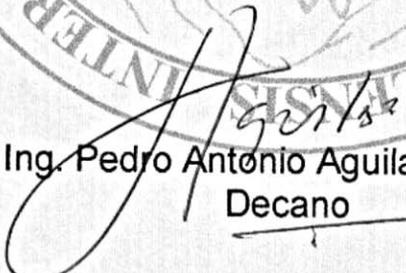


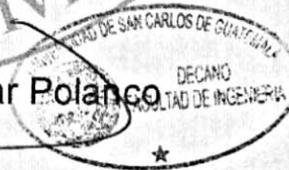
Facultad de Ingeniería
Decanato

Ref. DTG.389-2016

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: **EVALUACIÓN DEL CONTENIDO DE ÁCIDO LÁCTICO EN JUGOS FILTRADOS PARA EL MONITOREO DE PÉRDIDAS DE SACAROSA EN DOS TECNOLOGÍAS DE FILTRACIÓN DE CACHAZA EN TRES INGENIOS GUATEMALTECOS**, presentado por la estudiante universitaria: **Raisa Alejandra Vega Manzo**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, se autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE.


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano



Guatemala, agosto de 2016

/cc

ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser la fuente de mi sabiduría, fortaleza y soporte para alcanzar esta meta. Gracias por rodearme de amor y bendiciones.
- Mi padre** Alejandro Vega y Hermelinda Manzo de Vega, por ser inspiración y ejemplo, por su lucha diaria para darme la mejor herencia, mi educación. Por enseñarme el valor de las cosas y a tener valores para alcanzar las metas propuestas. Los amo y este logro es de ustedes.
- Mi hermanos** Eder y Jason Vega Manzo, por compartir su cariño, ejemplo y apoyo invaluable en todo momento. Por apoyarme en cada logro alcanzado.
- Mi familia** Tíos, tías, primos y primas, por su cariño, amistad y siempre estar pendientes de mí.
- Mis novio** Deniz Arriaza, por su increíble amor, comprensión y apoyo en todo momento de mi vida y carrera profesional.

AGRADECIMIENTOS A:

**Universidad de San
Carlos de Guatemala**

Por ser mi casa de estudios y haberme dado una gran oportunidad de crecimiento personal y profesional.

Facultad de Ingeniería

Por brindarme los conocimientos necesarios para formarme como profesional.

**Mis amigos de la
Facultad**

Joana Estrada, Gabriela Díaz, Fernando Rosales y Nimsi Leví, por todos los momentos compartidos en tan inolvidable etapa. Que su vida esté llena de éxitos.

Mi amiga

Rosario Escobar, por su sincera amistad. Todos los recuerdos y experiencias vividas juntas siempre las llevo en mi corazón.

**Familia Escobar
Anavisca**

Por apoyarme en todo momento y compartir mis alegrías

Mi asesor

Ing. Byron López, por su tiempo, experiencia y extensos conocimientos que fueron pieza fundamental en este trabajo de graduación.

**Programa Investigación
Industrial de cengicaña**

Ing. Mario Muñoz, Danilo Palma y Francisco Méndez, por su apoyo y guía incondicional en la parte experimental del presente trabajo de investigación.

**Laboratorio Agronómico
de cengicaña**

Técnicos de laboratorio y en especial a la Licda. Wendy de Cano, por su amabilidad y apoyo brindado en la parte experimental analítica del presente trabajo de investigación.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
HIPÓTESIS.....	XVIII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. ANTECEDENTES	1
2. MARCO TEÓRICO.....	5
2.1. Industria azucarera	5
2.2. Caña de azúcar	7
2.2.1. Composición química de la caña.....	7
2.3. Proceso de fabricación de azúcar.....	8
2.3.1. Corte y recepción de caña.....	9
2.3.2. Preparación de caña.....	10
2.3.3. Molienda de caña	11
2.3.4. Clarificación	12
2.3.5. Evaporación.....	15
2.3.6. Cristalización	16
2.3.7. Centrifugación	17
2.3.8. Enfriamiento, secado y envasado.....	18
2.4. Filtros de cachaza.....	19
2.4.1. Filtros rotativos al vacío	20

2.4.1.1.	Parámetros de control de filtros rotativos	22
2.4.2.	Filtro banda	23
2.4.2.1.	Parámetros de control de filtros banda ...	24
2.4.3.	Retención de filtros.....	25
2.5.	Pérdidas de sacarosa en fábrica	26
2.5.1.	Pérdidas determinadas	27
2.5.2.	Pérdidas indeterminadas.....	28
2.5.2.1.	Pérdidas químicas	28
2.5.2.2.	Pérdidas físicas	28
2.5.2.3.	Pérdidas microbiológicas.....	29
2.6.	Ácido láctico	30
2.6.1.	Bacterias lácticas	33
3.	METODOLOGÍA	35
3.1.	Variables	35
3.1.1.	Variables de análisis independientes	35
3.1.2.	Variables de análisis dependientes	35
3.1.3.	Variables constantes	36
3.2.	Delimitación del campo de estudio.....	37
3.2.1.	Obtención de materia prima	37
3.2.2.	Análisis fisicoquímicos de las muestras	37
3.2.3.	Métodos analíticos	38
3.3.	Recursos humanos disponibles.....	39
3.4.	Recursos físicos	39
3.4.1.	Muestras y reactivos	39
3.4.2.	Instrumentos de medición, cristalería, equipo auxiliar y materiales diversos.....	40
3.5.	Técnica cualitativa o cuantitativa.....	42

3.6.	Recolección y ordenamiento de la información	42
3.7.	Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información	52
3.8.	Análisis estadístico	56
4.	RESULTADOS	59
4.1.	Carga microbiológica en filtros de cachaza	59
4.2.	Contenido de ácido láctico en las corrientes del área de filtración	60
4.3.	Retención de lodos en filtros de cachaza	62
4.4.	Análisis de agotamiento de cachaza	64
5.	INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	67
	CONCLUSIONES	73
	RECOMENDACIONES	75
	BIBLIOGRAFÍA.....	77
	APÉNDICES	81
	ANEXOS.....	91

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Participación en producción mundial de azúcar 2014-2015.....	6
2.	Caña de azúcar.....	7
3.	Mesa alimentadora.....	10
4.	Diagrama de tándem de molinos.....	12
5.	Diagrama de alcalinización.....	13
6.	Clarificador circular con alimentación central.....	14
7.	Sistema de evaporadores de múltiple efecto.....	15
8.	Diagrama de un sistema de tachos.....	17
9.	Diagrama de centrífuga.....	18
10.	Diagrama de operación de un ingenio azucarero.....	19
11.	Diagrama de operación de filtro rotativo de cachaza.....	21
12.	Diagrama de telas de filtro banda.....	24
13.	Porcentaje de sólidos en el filtro en función del porcentaje de retención.....	25
14.	Representación de pérdidas de sacarosa en un ingenio.....	27
15.	Reacción de inversión y formación de dextrana.....	29
16.	Reacción de fermentación láctica.....	32
17.	Relación en peso de sacarosa fermentada a ácido láctico.....	33
18.	Bacterias lácticas.....	34
19.	Contenido promedio de ácido láctico (en ppm) por corrientes, ingenio A, método de espectroscopia ultravioleta-visible (UV) - Roche.....	60

20.	Contenido promedio de ácido láctico (en ppm) por corrientes, ingenio B, método reflectométrico - RQflex10	61
21.	Contenido promedio de ácido láctico (en ppm) por corrientes, ingenio C, método reflectométrico - RQflex10	61
22.	Retención promedio (por día) para ambas tecnologías de filtración de cachaza, Ingenio A	63
23.	Retención promedio (por día) para ambas tecnologías de filtración de cachaza, Ingenio B	63
24.	Retención promedio (por día) para la tecnología de filtración de cachaza banda, Ingenio C	64
25.	Análisis de Pol de cachaza (promedio diario), Ingenio A	65
26.	Análisis de Pol de cachaza (promedio diario), Ingenio B	65
27.	Análisis de Pol de cachaza (promedio diario), Ingenio C	66

TABLAS

I.	Composición de la caña de azúcar	8
II.	Propiedades del ácido láctico	31
III.	Determinación de variables independientes	35
IV.	Determinación de variables dependientes	36
V.	Determinación de las variables constantes	36
VI.	Métodos analíticos utilizados para el estudio de pérdidas de sacarosa en filtros de cachaza	38
VII.	Muestras y reactivos	40
VIII.	Instrumentos de medición y equipo auxiliar	41
IX.	Recolección de datos de jugo claro, Ingenio A	43
X.	Recolección de datos de lodo, Ingenio A	43
XI.	Recolección de datos de jugo filtrado de filtro rotativo, Ingenio A	44
XII.	Recolección de datos de jugo filtrado de filtro banda, Ingenio A	44

XIII.	Recolección de datos de cachaza filtro rotativo, Ingenio A	45
XIV.	Recolección de datos de cachaza filtro banda, Ingenio A	45
XV.	Recolección de datos de jugo claro, Ingenio B	46
XVI.	Recolección de datos de lodo, Ingenio B	46
XVII.	Recolección de datos de jugo filtrado de filtro rotativo, Ingenio B	47
XVIII.	Recolección de datos de jugo filtrado de filtro banda, Ingenio B.....	47
XIX.	Recolección de datos de cachaza filtro rotativo, Ingenio B	48
XX.	Recolección de datos de cachaza filtro banda, Ingenio B.....	48
XXI.	Recolección de datos de jugo claro, Ingenio C	49
XXII.	Recolección de datos de lodo, Ingenio C	49
XXIII.	Recolección de datos de jugo filtrado de filtro banda, Ingenio C.....	50
XXIV.	Recolección de datos de cachaza filtro banda núm.1, Ingenio C.....	50
XXV.	Recolección de datos de cachaza filtro banda núm.2, Ingenio C.....	51
XXVI.	Recolección de datos de cachaza filtro banda núm.3, Ingenio C.....	51
XXVII.	Tabulación y ordenamiento de datos del Ingenio A	52
XXVIII.	Tabulación y ordenamiento de datos del Ingenio B	54
XXIX.	Tabulación y ordenamiento de datos del Ingenio C	55
XXX.	Análisis de varianza con arreglo bifactorial combinatorio.....	57
XXXI.	Prueba t pareada ($\alpha=0,05$) para evaluación de las tecnologías de análisis de ácido láctico.....	58
XXXII.	Recuento de mesófilos y termófilos (UFC/g) en el área de Filtración de Cachaza para dos ingenios.....	59
XXXIII.	Estimación de pérdidas de sacarosa diarias por fermentación láctica en área de filtración de cachaza para tres ingenios	62
XXXIV.	Estimación de recuperación de sacarosa por cambio de filtro rotativo a filtro banda.....	62
XXXV.	Estimación de pérdidas de sacarosa en cachaza para tres ingenios ...	66

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
A	Absorbancia
Ac Lac	Ácido láctico
gpm	Galones por minuto
°Bx	Grados Brix
°C	Grados Celcius
g/L	Gramo por litro
h	Hora
kg	Kilogramo
kg/TC	Kilogramo por tonelada de caña
m²	Metros al cuadrado
mm Hg	Milímetros de mercurio
ppm	Partes por millón
PM	Peso molecular
% m/m	Porcentaje en masa
pH	Potencial de hidrógeno
qq	Quintal
sac	Sacarosa
ton	Tonelada corta
UFC/g	Unidades formadoras de colonias por gramo

GLOSARIO

Alcalinización

Proceso que consiste en aplicar cal, ya sea como lechada de cal o sacarato, al jugo sulfitado o mezclado para neutralizar la acidez natural del jugo y formar sales insolubles de cal.

Azúcares invertidos

Sustancias invertidas de sacarosa existentes en la caña y se expresan como azúcares reductores. Los ejemplos más comunes en el ámbito azucarero son la glucosa y la fructosa.

Bagacillo

Partículas muy pequeñas de bagazo, separadas mediante tamizado, generalmente usado como ayuda filtrante en los filtros de cachaza.

Bagazo

Residuo que sale de cada molino. En general el término bagazo se refiere al que sale del último molino.

Cachaza

Es el residuo (torta) que resulta de la filtración y lavado de los lodos sedimentados en los filtros de cachaza.

Cera	Revestimiento de la caña que precipita en el proceso de clarificación pasando a formar parte de la cachaza.
Clarificación	Es el proceso en el que se elimina la materia orgánica, tierra y cualquier materia extraña del jugo; consiste en sulfatación, alcalinización, calentamiento y decantación.
Decantación	Proceso de sedimentación del jugo alcalizado y caliente que separa el jugo claro de los sedimentos llamados lodos.
Fibra	Estructura fibrosa insoluble seca de la caña.
Floculante	Polímero que aglutina los sólidos suspendidos en el jugo provocando su precipitación.
Grados Brix	Unidad de medida que expresa el porcentaje en peso de sólidos disueltos en una solución azucarada. Es el porcentaje de sólidos totales (azúcares y no azúcares) disueltos en el jugo.
HPLC	Cromatografía líquida de alto desempeño (High Performance Liquid Chromatography).
Humedad	Contenido de agua en una muestra sólida. Se representa como porcentaje de peso de agua contenido.

ICUMSA	Comisión internacional de métodos uniformes para el análisis de azúcar (International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis).
Jugo alcalizado	Es el jugo mezclado que se trata con lechada de cal.
Jugo claro	Es el jugo que se obtiene en los clarificadores luego de la decantación de lodos.
Jugo filtrado	Es el jugo resultante de la filtración y lavado del lodo dispuesto en los filtros rotativos al vacío o en filtros banda.
Lodo caliente	En Guatemala también llamada cachaza. Es el residuo que se obtiene durante el proceso de decantación de impurezas en los clarificadores.
Pol	Concentración de una solución de sacarosa pura en agua; para soluciones que contienen únicamente sacarosa en agua, el pol es una medida de la concentración de la sacarosa presente; para soluciones que contienen sacarosa y otras sustancias ópticamente activas, el pol es la suma algebraica de las rotaciones ópticas de los constituyentes.

Pureza	Es la relación porcentual entre Pol y grados Brix de una solución. Indica la proporción entre sacarosa y sólidos solubles totales.
Retención	Porcentaje total de sólidos de lodo de la alimentación de filtros que es retenido por los mismos en la torta de cachaza.
Sacarosa	Compuesto químico orgánico de fórmula $C_{12}H_{22}O_{11}$, también denominado comúnmente como azúcar y pertenecientes al grupo de compuestos llamados carbohidratos.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo determinar pérdidas de sacarosa en función del análisis de ácido láctico, y parámetros fisicoquímicos de las corrientes del área de clarificación y filtros de cachaza en tres ingenios guatemaltecos.

La investigación consistió en tomar muestras de jugo clarificado, lodo caliente, jugo filtrado y cachaza de filtros rotativos y banda en tres ingenios; se agregó inmediatamente bactericida a los flujos líquidos, para evitar la fermentación de azúcares. Los análisis realizados a las muestras fueron grados Brix, Pol, pureza, pH, humedad y ácido láctico, en conjunto con las retenciones de lodos en los filtros de banda y rotativos. Las mediciones realizadas fueron promediadas por día, y conjuntamente a los flujos de las corrientes que cada uno de los ingenios proporcionó, se pudo cuantificar las pérdidas promedio de sacarosa generadas por actividad microbiana, recirculación de lodos y agotamiento de cachaza.

Se encontró un ingenio con problemas con el Pol % cachaza y la retención en una de las tecnologías; en los otros ingenios analizados, se llegó a determinar que el filtro banda puede representar una ventaja significativa contra los filtros rotativos para las variables mencionadas. Analizando las pérdidas microbianas identificadas por la concentración de ácido láctico en jugo filtrado e inferido en cachaza, se determinó que no representan una pérdida significativa con respecto a las pérdidas totales (pérdida máxima calculada de 0,08 kg/TC para ingenio con pérdidas totales de 22,7 kg/TC), y que los filtros banda

generan una cantidad significativamente menor de ácido láctico que los filtros rotativos.

OBJETIVOS

General

Evaluar las pérdidas de sacarosa en función a los análisis de ácido láctico y con base en el monitoreo de parámetros fisicoquímicos de las corrientes de cachaza, lodos y jugos en el área de clarificación, analizando dos tecnologías de filtración de cachaza.

Específicos

1. Realizar determinaciones de los parámetros fisicoquímicos: °Bx, Pol aparente, humedad y pH, en los flujos de lodo, cachaza, jugo filtrado y jugo clarificado para realizar una comparación en la recuperación de sacarosa proveniente de ambos tipos de filtros.
2. Determinar el contenido de ácido láctico en los flujos de lodo, jugos filtrados y jugo claro, mediante tres diferentes metodologías analíticas.
3. Determinar los porcentajes de retención de lodos en los dos tipos de filtros de cachaza actualmente utilizados en los ingenios azucareros de Guatemala.
4. Determinar la carga microbiológica, en términos de UFC, en los jugos filtrados de los dos tipos de filtros de cachaza utilizados en los ingenios azucareros de Guatemala.

5. Establecer cuál de las dos tecnologías de filtración de cachaza rinde menor pérdida de sacarosa en función de los resultados obtenidos del estudio de flujos.

Hipótesis

Es posible evaluar las pérdidas indeterminadas de sacarosa en función del monitoreo de ácido láctico en los jugos filtrados y con base en la tecnología de filtración de cachaza utilizada en ingenios azucareros guatemaltecos.

Hipótesis nula

- **H_0 :** No existe diferencia significativa en el contenido de ácido láctico analizado en los jugos filtrados de ambas tecnologías de filtración de cachaza.

Hipótesis alternativa

- **H_a :** Existe diferencia significativa en el contenido de ácido láctico analizado en los jugos filtrados de ambas tecnologías de filtración de cachaza.

INTRODUCCIÓN

En la industria azucarera las tecnologías cambian más lentamente que en otras industrias, este es el caso de las tecnologías de filtración de cachaza, donde el filtro rotativo al vacío es el que se ha utilizado desde hace años mientras que el filtro banda lleva pocos años de ser introducido en algunos ingenios guatemaltecos. El actual estudio surgió con la finalidad de confrontar los dos tipos de filtros de cachaza actualmente utilizados en Guatemala, para determinar si uno u otro muestran menores pérdidas de sacarosa causadas por productos microbiológicos, recirculación de lodos y agotamiento de cachaza.

El paradigma actual de pérdidas de sacarosa en los ingenios de Guatemala indica que se reporten las que se analicen en los subproductos y efluentes, mientras que en la literatura, no solo actual sino de los años 60, 70 u 80 como el libro de Pieter Honig *principios de termología azucarera* o el libro técnico publicado por Hulett's Sugar Limited *Research and development: sugar technology*, indican que sí existen y se pueden determinar pérdidas de sacarosa químicas y microbiológicas en distintas áreas del proceso.

“Diversos estudios han demostrado que existe significativa pérdida de sacarosa en el área de filtración de cachaza, y no está asociada únicamente a un inadecuado agotamiento, sino también a una alta actividad microbiológica, donde esta pérdida puede ser calculada por monitoreo de ácido láctico u otros productos de fermentación de sacarosa.”¹

¹ GOVENDER, K.; WILLIAMSON, A. *An investigation into undetermined loss at Komati mill.* 1969. p. 178.

Al reconocer la alta actividad microbiológica en el área de filtración, determinar el contenido de ácido láctico en las corrientes del área y establecer una relación entre sacarosa destruida y ácido láctico formado, se puede calcular las pérdidas de sacarosa por actividad microbiológica en los ingenios guatemaltecos.

Para evaluar la importancia de asegurar la calidad del jugo filtrado, removiendo el mayor porcentaje de sólidos insolubles de los lodos, se debe analizar el efecto que generan los sólidos insolubles al ser retornados con el jugo filtrado de nuevo hacia el proceso y como estos pueden llegar a sobrepasar la capacidad del sistema clarificación-filtración. Rein sugiere distintas metodologías para evaluar la retención de lodos.

Actualmente en el área de filtración el producto de análisis e interés ha sido únicamente la cachaza y su contenido de sacarosa para determinar pérdidas, cuando en el producto de dicha área debería de ser el jugo filtrado con la mayor cantidad de sólidos solubles y menor cantidad de sólidos insolubles.

El estudio tiene como finalidad determinar que tecnología de filtración cumple con el agotamiento, baja actividad microbiana y alta retención de lodos, como parámetros generales de operación y eficiencia.

1. ANTECEDENTES

Para profundizar acerca del tema de pérdidas de sacarosa por factores microbiológicos, específicamente por fermentación láctica, y retención de los filtros de cachaza, se consideraron diversos estudios de investigación extranjeros, entre los más importantes están:

Mud filtration. traducción (Filtración de lodos), trabajo de investigación realizado por G.R.E. Lionnet en 1996. En este trabajo se analizan varias etapas del proceso de filtración dentro de un ingenio y demuestran que una de las pérdidas de sacarosa más significativa tiene lugar en las estaciones de filtros y que dichas pérdidas son causadas por actividad microbiológica alta, calculándolas a través de la determinación de ácido láctico. A partir de este estudio también se establece que 1 ppm de ácido láctico (PM= 90,08) representa una pérdida de alrededor de 4 ppm de sacarosa (PM= 342,30), dando inicio a demostrar que existen otros indicadores no convencionales para determinación de destrucción de sacarosa.

An investigation into undetermined loss at Komati mill, (traducción Investigación de pérdidas indeterminadas en el ingenio Komati) artículo científico realizado por K. Govender e incluido dentro de los trabajos realizados por la asociación de técnicos azucareros de Sudáfrica en 1996. Se evalúan muestras de jugo mezclado, alcalizado, clarificado, filtrado y lodo, confirmando nuevamente el aumento de ácido láctico en la etapa de filtración. Los hallazgos fueron muy reveladores mostrando el proceso fermentativo de sacarosa que convierte al disacárido en forma de ácido láctico, aun cuando en el lodo ni siquiera existía en gran proporción.

Lactic acid formation across a filter station (traducción Formación de ácido láctico a través de la estación de filtración). trabajo de investigación realizado por S.J. Madaree como parte de los trabajos realizados por la asociación de técnicos azucareros de Sudáfrica en 1991. Este estudio recopila datos en la estación de filtrado de cinco temporadas, evaluando las distintas condiciones del proceso (temperatura, pH, °Bx, presión) y así establecer las causas que dan origen a la alta actividad microbiológica en dicha etapa. Los resultados manifestaron que la producción de ácido láctico depende de dichas condiciones de proceso y modificándolas consiguieron reducir su concentración en la corriente de jugo filtrado.

Impacto de la microbiología en la fabricación de azúcar, estudio realizado por Maurice Raimbault dentro del programa Fondo de Nuevos Desarrollos en 1994. En este trabajo se determinó el impacto importante que tienen las bacterias lácticas (sobre todo *Leuconostoc*) sobre la calidad de la caña y la eficiencia de la fabricación de azúcar. Mostrando los inconvenientes que se presentan por deterioro de polisacáridos indeseables (gomas) en el proceso azucarero y que las mismas se pueden controlar por biocidas, controladores de temperatura y limpieza a vapor.

Dentro de los trabajos de investigación nacionales se encuentra uno que da inicio al análisis e importancia de la selección filtros de cachaza en ingenios guatemaltecos:

Calificación del desempeño de un filtro banda para maximizar la recuperación de sacarosa en la cachaza proveniente de la clarificación del jugo de caña, Tesis realizada por Amilcar Ayala, en la Universidad de San Carlos de Guatemala, en 2012. En este trabajo se evaluó la instalación de un filtro relativamente nuevo, el filtro banda, y se buscó las condiciones adecuadas para

optimizar su funcionamiento. Como parte de la evaluación en filtro banda, también se compara el jugo filtrado obtenido por el filtro banda, con el jugo filtrado obtenido con los filtros rotativos al vacío, que tienen varios años de ser utilizados para filtrar la cachaza en Guatemala. Al comparar el jugo filtrado de ambos filtros se obtuvo una idea de la calidad del jugo filtrado que se regresa al proceso de clarificación.

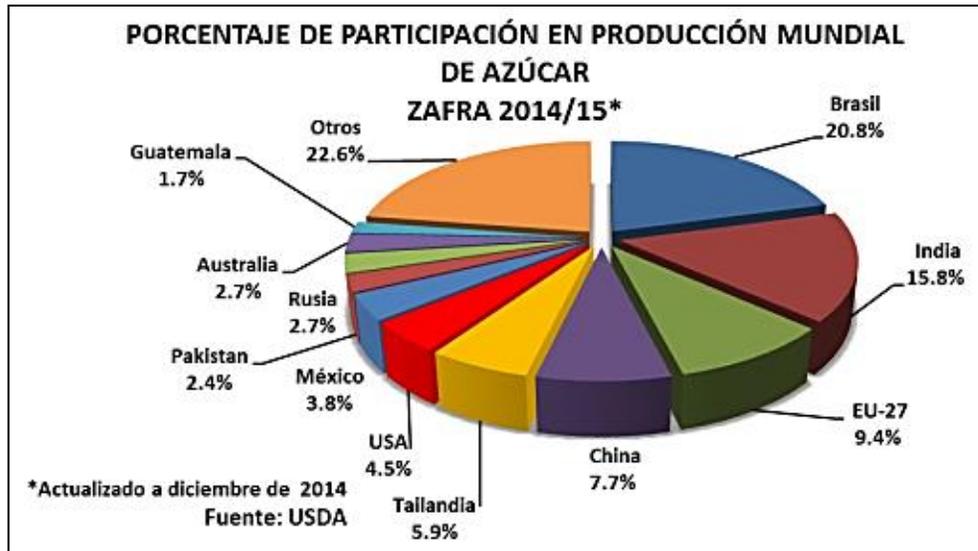
2. MARCO TEÓRICO

2.1. Industria azucarera

El sector azucarero tiene gran importancia en la producción agroindustrial Guatemalteca y una fuerza determinante en la economía de la costa del Pacífico. En el continente americano, Brasil es el mayor productor de azúcar pues cuenta con 193 millones de personas y un vasto territorio del tamaño de 2 veces el de la Unión Europea." Muchos lo llaman "la nueva granja en el mundo", con 280 millones de hectáreas de tierras para la agricultura y la ganadería, es también el mayor productor y exportador de azúcar. Por su parte, Guatemala se posiciona en el onceavo lugar con 2,6 millones de toneladas métricas, que representa aproximadamente el 1,7 % de la producción mundial."²

² *Análisis económico ABG. Sector azucarero a marzo 2015.*

Figura 1. Participación en producción mundial de azúcar 2014-2015



Fuente: *Análisis económico del sector azucarero*. <http://abg.org.gt/>.

Consulta: noviembre de 2015.

De acuerdo con la información de la Asociación Azucarera de Guatemala (Asazgua), en Guatemala continúan operando 12 ingenios, ubicados en 4 departamentos de la zona del Pacífico. En la zafra 2013-2014, estas fábricas se encuentran cultivando alrededor de una área de 235 mil hectáreas, un 2,2 % del área cultivada en Guatemala, en las que se producen 20,8 millones de toneladas de caña molida.

Tradicionalmente la industria azucarera basa su producción en tres productos principales: azúcar, electricidad y alcohol. Los mercados de estos tres productos presentan demandas con cierta variabilidad, que en algún momento pudiera representar una incertidumbre y menores ingresos de los previstos por los productores.

2.2. Caña de azúcar

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L) es una gramínea tropical, un pasto gigante emparentado con el sorgo y el maíz en cuyo tallo se forma y acumula un jugo rico en sacarosa, compuesto que al ser extraído y cristalizado en el ingenio forma el azúcar de caña. La sacarosa es sintetizada por la caña gracias a la energía fijada del sol durante la fotosíntesis y los nutrientes que han sido aportados por el suelo.

Figura 2. Caña de azúcar



Fuente: *Manual del azúcar de caña*. <http://nuevaya.com.ni/>. Consulta: mayo de 2015.

2.2.1. Composición química de la caña

“Los tallos corresponden a la sección anatómica y estructural de la planta de caña de azúcar, que presenta mayor valor económico e interés para la fabricación de azúcar.”³ En términos generales, la composición química de la caña de azúcar está influenciada por factores ambientales y labores culturales de acuerdo a las variedades, edad de la caña o estado de madurez, entre otros.

³ CHEN, James. *Manual del azúcar de caña*. p. 44.

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

Caña triturada	Caña (%)
Agua	73-76
Sólidos	24-27
Sólidos solubles	10-16
Fibra (seca)	11-16
Componentes del guarapo	Sólidos solubles (%)
Azúcares	75-92
Sacarosa	70-88
Glucosa	2-4
Fructosa	2-4
Sales	3.0-4.5
Ácidos inorgánicos	1.5-4.5
Ácidos orgánicos	1.0-3.0
Ácidos orgánicos	1.5-5.5
Ácidos carboxílicos	1.1-3.0
Aminoácidos	0.5-2.5
Otros no azúcares orgánicos	
Proteínas	0.5-0.6
Almidón	0.001-0.050
Gomas	0.3-0.60
Ceras	0.05-0.15
Otros	3.0-5.0

Fuente: CHEN, James. *Manual del azúcar de caña*. p. 45

2.3. **Proceso de fabricación de azúcar**

El llamado proceso de fabricación de azúcar, consiste esencialmente en separar la sacarosa, en su forma pura, de los distintos materiales a los cuales está asociada en la planta de caña.

El azúcar se produce en el campo y se extrae y cristaliza en la fábrica, a través de procesos que involucran diferentes disciplinas profesionales y que, al conjugar esos esfuerzos, el resultado final es el producto listo para comercializar. A continuación se describen los diferentes pasos que se dan para la obtención de azúcar a partir de la caña.

2.3.1. Corte y recepción de caña

El proceso empieza por el corte de caña que puede hacerse en forma manual o mecanizada. Para facilitar la labor del cortador y eliminar en buena proporción la biomasa formada por las hojas, se procede a la quema de los cañaverales.

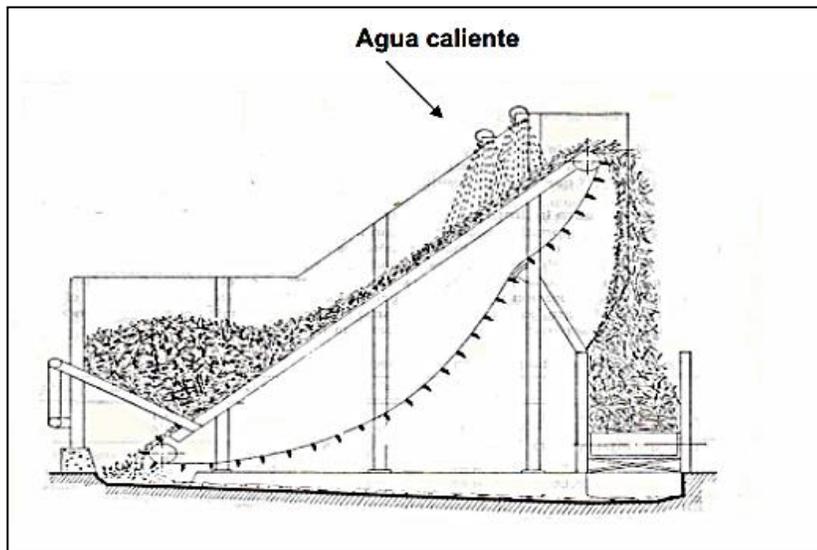
Posteriormente al corte viene el alza y la caña cortada en el campo es llevada al ingenio por medio de camiones compuestos por jaulas, los cuales trasladan la caña a granel y en otros casos, se transporta la caña atada formando maletas, en camiones y plataformas. Luego la caña es descargada de los medios de transporte hacia las mesas alimentadoras, por medio de descargadores móviles con accionamiento hidráulico.

En este punto, que consiste en la recepción de la materia prima, es necesario tomar en cuenta la calidad de la caña que entra, para ello se toman muestras de las jaulas, cuyo muestreo dependerá de la cantidad de caña que ingresa por hora, capacidad del equipo toma-muestras y del recurso humano que se cuente para realizar esta actividad.

2.3.2. Preparación de caña

Este es el punto inicial del proceso de fabricación de azúcar. La caña es descargada de los medios de transporte hacia las mesas alimentadoras, por medio de descargadores móviles con accionamiento hidráulico. En las mesas alimentadoras se le aplica agua para lavarla y las mesas dosifican la caña a los conductores de caña en los cuales es preparada para la molienda, haciéndola pasar por picadoras que cortan la caña en astillas pequeñas por medio de cuchillas giratorias.

Figura 3. Mesa alimentadora



Fuente: CHEN, James. *Manual del azúcar de caña*. p. 120.

La preparación de la caña persigue dos propósitos fundamentales:

- Incrementar el volumen de alimentación hacia los molinos, esto se logra mediante el aumento de densidad, producto de la preparación.

- Facilitar la extracción en los molinos al romper la estructura de la caña.

2.3.3. Molienda de caña

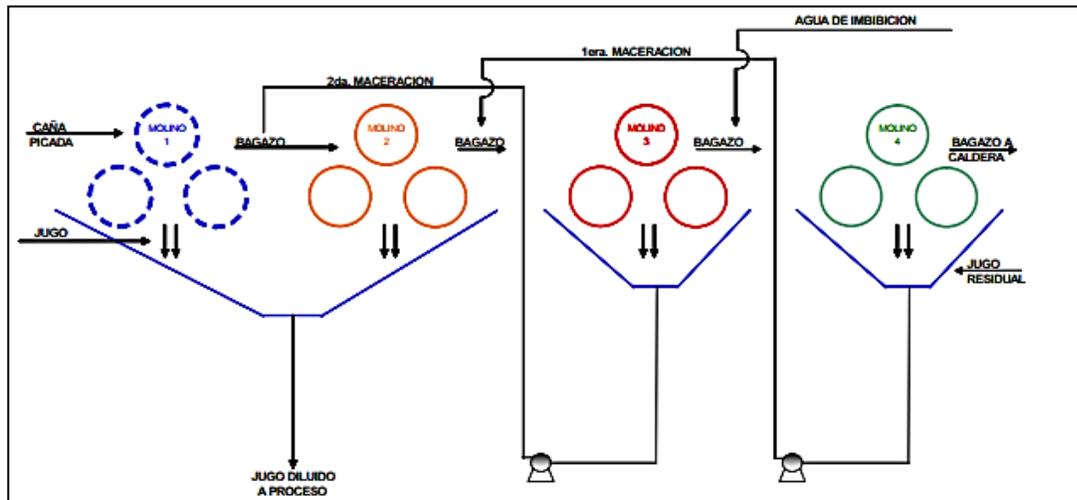
La caña preparada por las picadoras llega a un tándem de molinos, constituido cada uno de ellos por tres o cuatro mazas metálicas, las cuales extraen el jugo de la caña mediante la aplicación de presión. Cada molino está equipado con una turbina de alta presión. En el recorrido de la caña por el molino se agrega jugo o agua, generalmente caliente, para extraer al máximo la cantidad de sacarosa que contiene el material fibroso. Este proceso de extracción es llamado maceración.

El bagazo que sale de la última unidad de molienda se conduce a una bagacera para su almacenamiento, el cual posteriormente es utilizado como combustible para las calderas, produciendo el vapor de alta presión que se emplea en las turbinas de los molinos y el vapor de escape que se emplea en el sistema de evaporación.

“Es de hacer notar que en los molinos, el jugo de la caña es un caldo nutritivo para el desarrollo de microorganismos que degradan el jugo.”⁴ Los productos azucarados que ocurren si el proceso no está limpio durante su descomposición microbiológica son variados.

⁴ MELGAR, Mario, et. al. *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala*. p. 309.

Figura 4. Diagrama de tándem de molinos



Fuente: CUTZ SAQUIMUX, Luis. *Determinación de la pérdida de azúcar por exceso de lavado en una centrifuga semiautomática 1,22 m x 0,76 m Ingenio Trinidad* p. 8.

El jugo proveniente de los molinos contiene partículas finas de bagazo (bagacillo) y de tierra que tienen que eliminarse, antes de que el jugo pase al proceso de fabricación. El tipo de colador más común es el de tamices estacionarios, cuya superficie se mantiene limpia mediante el uso de raspadores, también hay coladores rotativos o DSM. Al pasar por el filtro el jugo se deposita en un tanque, en tanto que el bagacillo que ha sido separado se recoge por medio de un conductor de raspador que lleva el bagacillo de nuevo a los molinos.

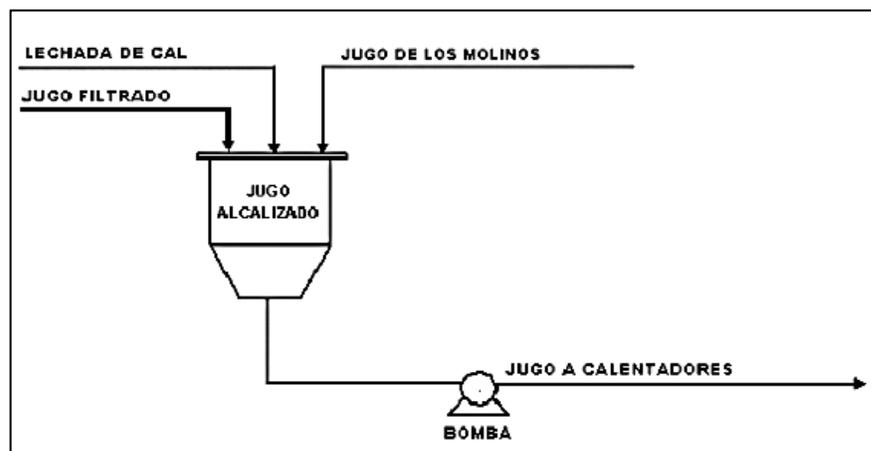
2.3.4. Clarificación

El jugo procedente de los molinos es ácido y de color verde oscuro, a este se le aplica SO_2 gaseoso, el cual reacciona con los algunos colorantes del jugo.

Después se neutraliza por medio de una suspensión de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ la cual eleva el pH, esto con el objetivo de minimizar las posibles pérdidas de sacarosa.

“Este proceso también forma sales insolubles de calcio, principalmente fosfatos de calcio y además, sulfatos insolubles. Luego el jugo alcalizado se eleva hasta 105 °C, esto coagula la albúmina y algunas grasas, ceras y gomas.”⁵

Figura 5. Diagrama de alcalinización



Fuente: CUTZ SAQUIMUX, Luis. *Determinación de la pérdida de azúcar por exceso de lavado en una centrifuga semiautomática 1,22 m x 0,76 m Ingenio Trinidad.* p. 10.

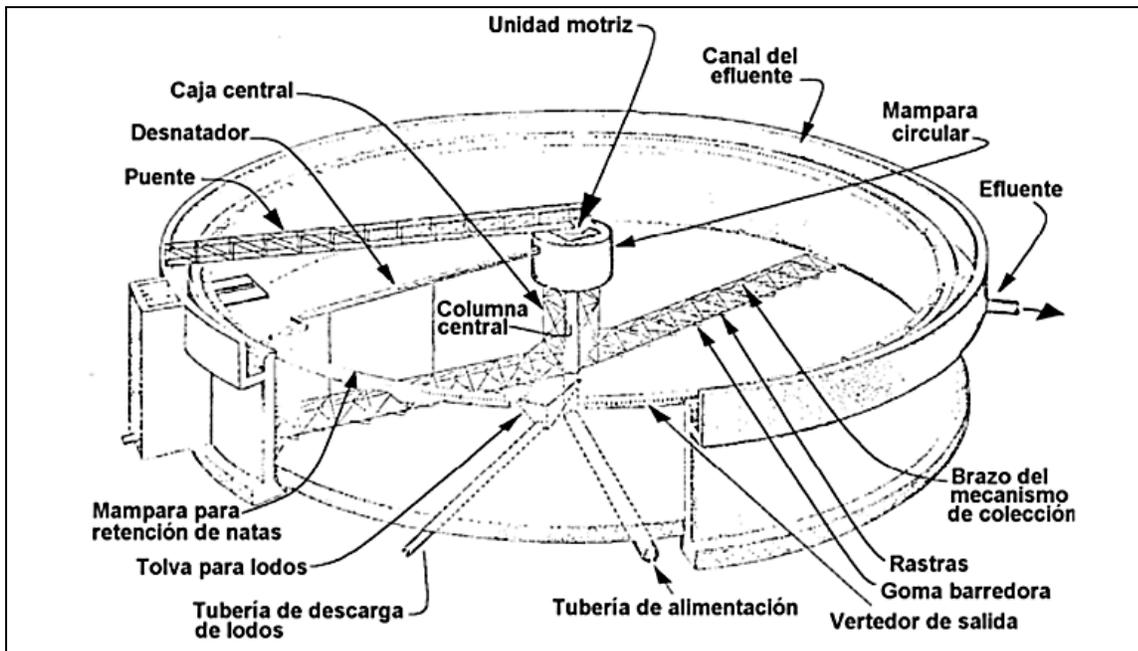
El propósito del proceso de clarificación es separar las impurezas presentes en el jugo alcalizado que contiene una considerable cantidad de materia coloidal en suspensión, que debe eliminarse para conseguir azúcares de alta pureza al final del proceso.

⁵ MELGAR, Mario, et al. *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala.* p. 312.

Entonces al jugo caliente se le adiciona floculante y se envía a los clarificadores, donde se logra la separación de los sólidos disueltos, los que se precipitan formando un lodo que se conoce como cachaza. El jugo que sale de los clarificadores es limpio y brillante, se le conoce como jugo clarificado y se envía a los evaporadores.

Los lodos que se obtienen de los clarificadores se envían a la estación de filtración donde se preparan con bagacillo, floculante y cal. Esta mezcla forma una torta porosa en los filtros rotativos al vacío, donde se le adiciona agua caliente y se le extrae la mayor cantidad de sacarosa posible.

Figura 6. **Clarificador circular con alimentación central**



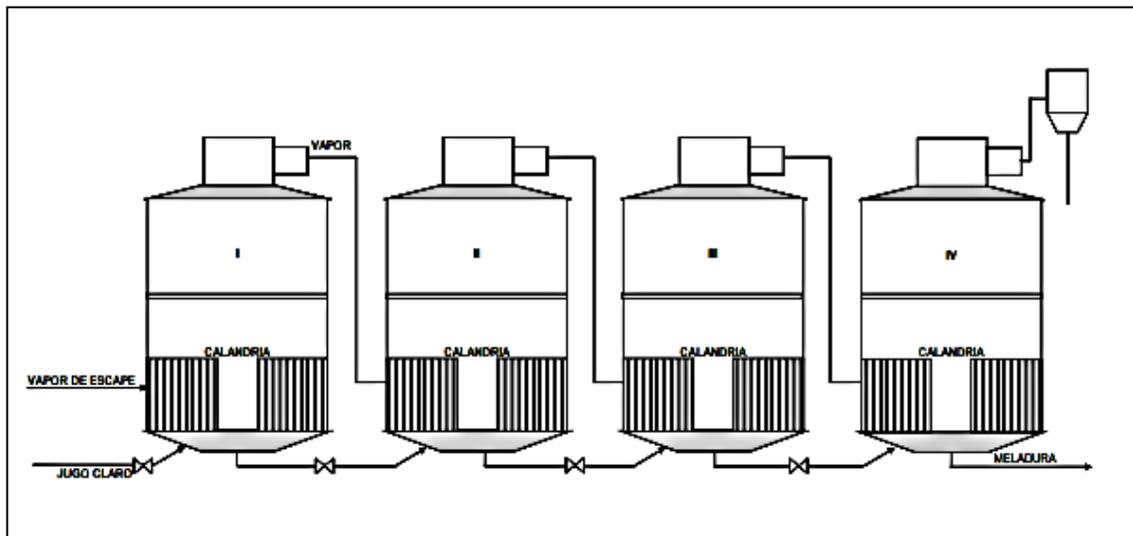
Fuente: Wikis paces. <http://procesosbio.wikispaces.com/Sedimentaci%C3%B3n>.

Consulta: agosto de 2015.

2.3.5. Evaporación

La evaporación consiste en una sucesión de efectos dispuestos en serie de manera que cada efecto subsiguiente tiene una presión menor, y por lo tanto, una temperatura de ebullición más baja. El vapor del último efecto llega a un condensador de tipo barométrico. El jugo entra y sale del sistema en forma continua, así de esta manera el jugo que ingresó al primer efecto de la evaporación con aproximadamente 15 grados Brix, sale del último ya en forma de jarabe, al cual se le llama “meladura” con aproximadamente 65 grados Brix.

Figura 7. Sistema de evaporadores de múltiple efecto



Fuente: CUTZ SAQUIMUX, Luis. *Determinación de la pérdida de azúcar por exceso de lavado en una centrifuga semiautomática 1,22 m x 0,76 m Ingenio Trinidad.* p. 14.

El objetivo de este proceso es eliminar la mayor cantidad de agua presente sin provocar cristalización (alrededor del 75 % del material inicial), también hacer mínima la descomposición de sacarosa por altas temperaturas

durante tiempos largos, y conseguir la evaporación deseada con la cantidad de vapor de calentamiento procedente del escape de las turbinas de los molinos o turbogeneradores.

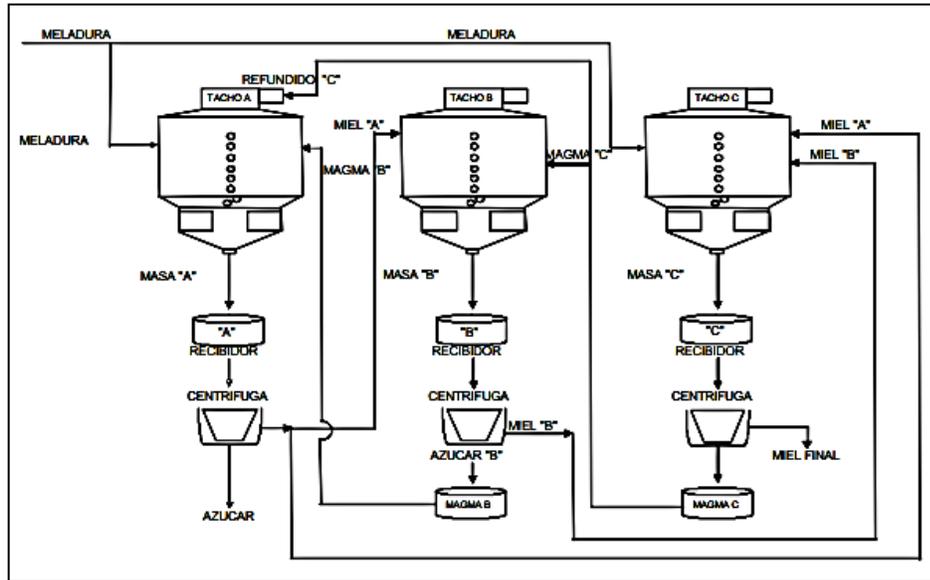
2.3.6. Cristalización

La cristalización consiste básicamente en la formación de los cristales de azúcar a partir de diferentes mieles. El proceso se efectúa en evaporadores al vacío de efecto sencillo comúnmente llamados tachos. Primeramente se concentra la meladura hasta que esta alcanza el punto de saturación. En tal condición se introducen cristales de siembra que sirven de núcleos a los cristales de azúcar. A medida que se evapora el agua se agrega meladura con el fin de aumentar el tamaño de los cristales.

La mezcla de cristales de siembra y meladura se concentra hasta formar una masa densa llamada “masa cocida”. En este punto el proceso finaliza y el contenido del tacho se descarga a través de una válvula colocada en la parte inferior.

Se emplea actualmente para la elaboración de azúcar crudo un sistema de tres masas, la cual produce masas C, que se purgan y producen miel final para la venta y magma de C. El magma de C sirve de semilla para producir masas de B que se alimentan con miel A proveniente de la purga de las centrifugas de masa A. Las masas B se purgan para generar miel B y magma de B. El magma de B sirve de semilla para las masas de A, las cuales se purgan y producen azúcar para la venta y miel A, la cual se reprocesa.

Figura 8. Diagrama de un sistema de tachos



Fuente: CUTZ SAQUIMUX, Luis. *Determinación de la pérdida de azúcar por exceso de lavado en una centrifuga semiautomática 1,22 m x 0,76 m Ingenio Trinidad.* p. 15.

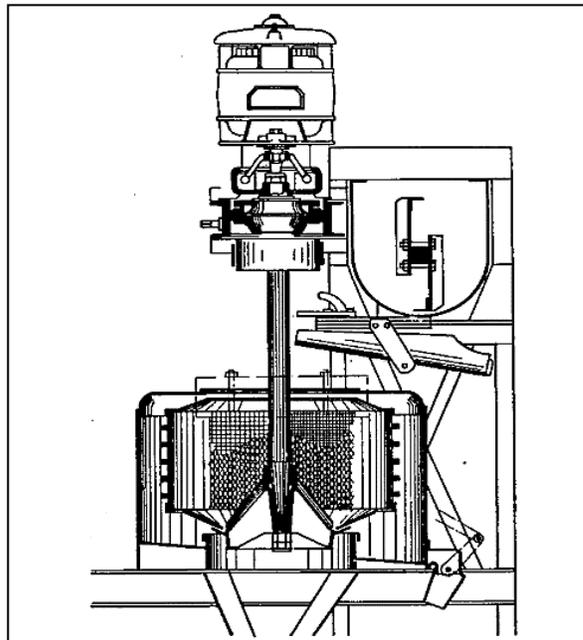
2.3.7. Centrifugación

La masa cocida proveniente del cristizador se carga a máquinas giratorias de alta velocidad, conocidas como centrífugas. Es un tambor cilíndrico suspendido de un eje, el tambor tiene paredes laterales perforadas forradas en el interior con un juego de una tela metálica. El revestimiento perforado retiene los cristales de azúcar lavada, la miel pasa a través de las telas debido a la fuerza centrífuga.

El objetivo de esta etapa del proceso es separar la miel madre y los cristales presentes en las masas; mantener hasta donde sea posible el tamaño y características de los cristales que se encuentren presentes y efectuar la

separación azúcar-miel en el menor tiempo posible, con el menor uso de energía y agua.

Figura 9. **Diagrama de centrífuga**



Fuente: *Diagrama de centrífuga*. <http://www.monografias.com/trabajos7/proind/proind.shtml>.

Consulta: agosto de 2015.

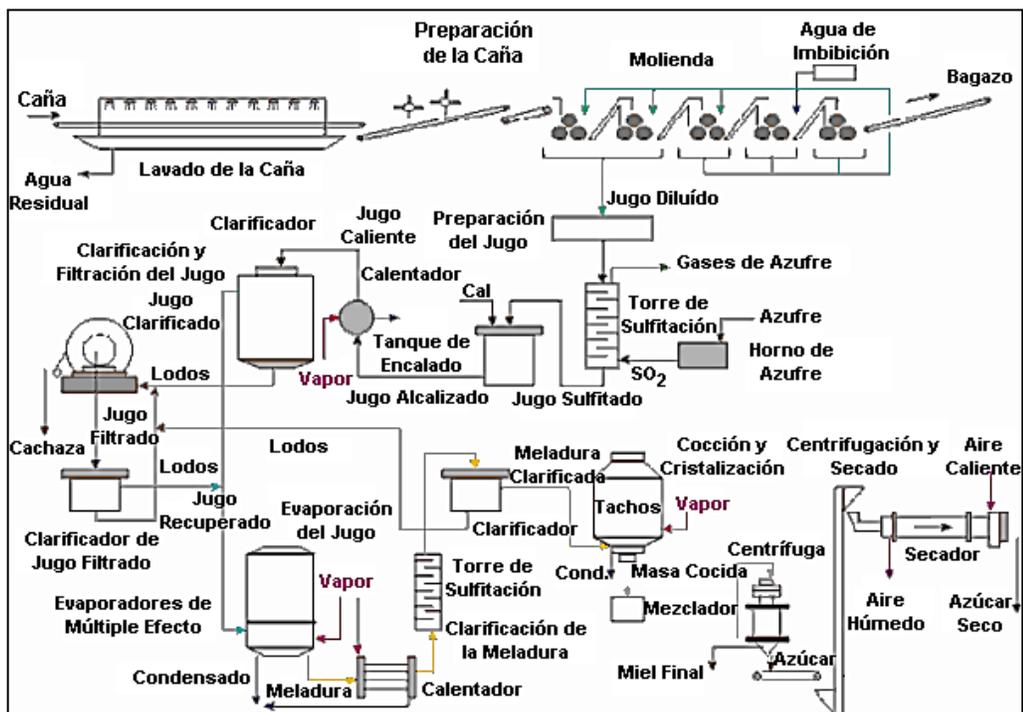
2.3.8. Enfriamiento, secado y envasado

El azúcar se seca para obtener un producto con características de humedad adecuada y necesaria para su conservación, ya sea en sacos o silos. El azúcar al salir de las centrífugas sale con aproximadamente 1 % de humedad y al pasar por la secadora esta baja a 0,1 %.

Para el almacenamiento de la azúcar cruda generalmente se utiliza bodegas de granel y es llevada a esta bodega por medio de un sistema de

conductores de faja o banda. En algunos lugares se utilizan sacos de polipropileno para almacenamiento, aunque este uso es más exclusivo para el caso de la azúcar blanca.

Figura 10. Diagrama de operación de un ingenio azucarero



Fuente: Tecnologías limpias. <http://www.tecnologiaslimpias.org/>. Consulta: agosto de 2015.

2.4. Filtros de cachaza

De todas las operaciones encontradas en la manufactura del azúcar de caña, la clarificación es quizá uno de los más importantes. Tanto la cantidad por unidad de peso como la calidad del azúcar dependen en gran medida de la pureza del jugo claro, el cual es producto de la clarificación.

Debido a la importancia de este factor, la filtración de lodos deberá analizarse no solo desde el punto de vista de la "eficiencia" sino también de la "calidad" del filtrado. Actualmente en Guatemala se utilizan dos tecnologías para el proceso de filtración: filtro banda y filtros rotativos al vacío.

2.4.1. Filtros rotativos al vacío

El filtro rotativo continuo al vacío es el de mayor uso en la filtración de cachaza de los ingenios azucareros. Los filtros rotativos continuos al vacío para filtrar cachaza fueron diseñados por Oliver-Campbell y descritos por Tromp en 1936, pero en la actualidad existen mucho más grandes y eficientes.

"El filtro está compuesto por un tambor hueco con gran diámetro, fabricado en acero inoxidable, que gira en torno a su eje horizontal y que se halla parcialmente sumergido en el líquido a ser filtrado. La periferia del tambor sirve como superficie filtrante y su cubierta típicamente se divide en 24 zonas independientes cada uno ocupando 15° sobre la circunferencia y extendiéndose a lo largo del tambor." ⁶

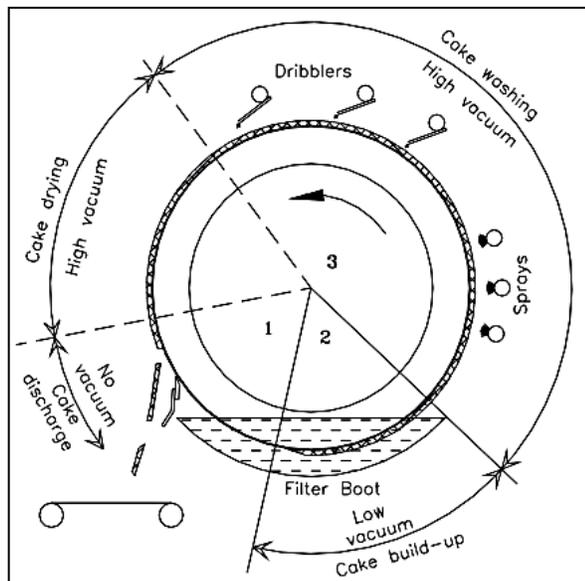
Cada una de estas secciones está conectada individualmente al sistema de vacío que consta de tres sectores diferentes. "El primero es el sector de descarga de la torta de filtro o cachaza, el cual desfoga directamente a la atmósfera. El segundo es el sector de adhesión o formación de torta, que está conectado directamente al tanque de un sistema de bajo vacío o con el tanque del sistema de alto vacío pero a través de una válvula de control que mantiene este sector al bajo vacío deseado, dicho sector genera un jugo turbio." ⁷

⁶ REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. p. 296.

⁷ CHEN, James. *Manual de azúcar de caña*. p. 86.

El tercer sector está conectado con una cámara que se mantiene a alto vacío y genera un jugo claro el cual puede continuar el proceso en conjunto al jugo saliente de clarificadores. La superficie exterior de malla del tambor consiste de lámina de acero inoxidable con perforaciones por centímetro cuadrado de 0,5 milímetros de diámetro.

Figura 11. Diagrama de operación de filtro rotativo de cachaza



Fuente: RAINEY, T. J. *Developments in mud filtration technology in the sugarcane industry*.

p. 39.

A medida que el tambor del filtro rota, la cachaza es succionada por el tambor formando una capa sobre su superficie. Luego pasa por una serie de rociadores de agua caliente, durante esta etapa se lava la torta de cachaza para extraer el jugo y la sacarosa que este contiene. Continúa la etapa de secado donde el jugo es succionado por el vacío. La torta se desprende del tambor por medio de un raspador y se rompe el vacío, dejando caer la torta de cachaza sobre la banda transportadora y comenzando el ciclo de nuevo.

2.4.1.1. Parámetros de control de filtros rotativos

El filtro rotatorio al vacío en la fábrica de azúcar nunca ha sido una unidad eficiente. El método por el cual la torta se construye en la cortina siempre resulta en algún filtrado fangoso que se devuelve al proceso. "A fin de reducir la cantidad de sólidos del lodo en el jugo filtrado y la cantidad de sacarosa en la torta de cachaza es esencial el conocimiento de los factores que influyen en el rendimiento del filtro. Las variables asociadas con el rendimiento del filtro rotativo incluyen:"⁸

- La temperatura del agua de lavado:
 - La temperatura del agua de lavado debe mantenerse por encima de 60 °C por debajo de esta temperatura la solidificación de ceras de la caña impide el paso del agua de lavado.
- Vacío de carga:
 - Un bajo vacío de carga promoverá la formación de una torta porosa de mejores propiedades de lavado y por lo tanto un contenido de sacarosa inferior en la torta.
- Relación bagacillo:
 - Una relación de bagacillo de 0,5 a 0,7 toneladas de fibra seca para 100 toneladas de caña molida.
- Período de retención de la torta:
 - Si el ciclo de filtración se reduce y otras variables relacionadas permanecen constantes, se disminuye la producción de torta, lo que resulta en un aumento en la proporción de agua de lavado de la torta, y una disminución del contenido de azúcar de la misma.
- Vacío durante el lavado:

⁸ Hulett's Sugar Limited. Research and Development: *Sugar Technology*. p. 125.

- Una presión absoluta debajo de la atmosférica es deseable durante el período de lavado con el fin de facilitar el paso del agua de lavado a través de la torta.
- Finura de bagacillo:
 - Se obtiene una torta más permeable cuando se utiliza un bagacillo más fino.

2.4.2. Filtro banda

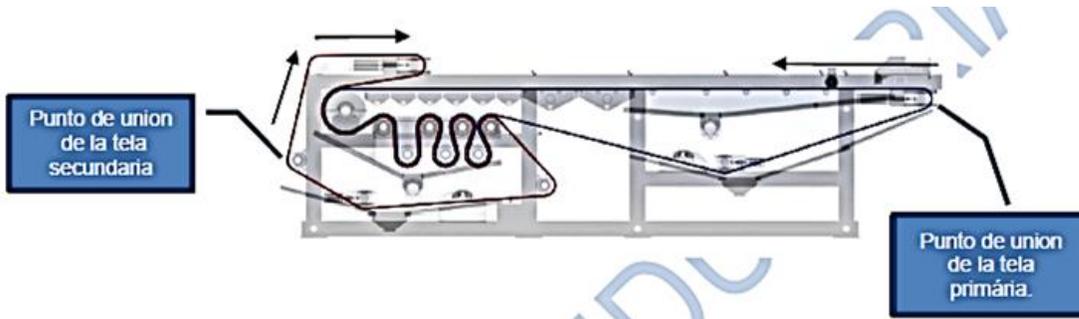
“El filtro banda es semejante a un transportador de banda con un soporte transversal o de drenaje que lleva la tela filtrante y que también tiene la forma de una banda sinfín.”⁹

La cachaza, con el pH estabilizado entre 7,5 y 8,5, ya mezclada con el floculante ingresa al filtro y se descarga sobre la tela primaria. La primera etapa es una filtración por gravedad, donde se obtiene un jugo filtrado muy limpio. La banda se mueve hacia la etapa de filtración por vacío donde se extrae otra fracción de jugo filtrado, pero de menor calidad.

Finalmente la tela secundaria se coloca sobre la torta de cachaza y exprime el jugo remanente en la cachaza. Las dos telas (primaria y secundaria) se separan y la torta se desprende y cae en la tolva de cachaza. Las telas se someten a un lavado para eliminar los restos de cachaza adheridos a ellas, el agua utilizada se envía a la imbibición de molinos. El jugo filtrado obtenido en las diferentes etapas de filtración se une y se envía a la etapa de alcalizado de jugo.

⁹ CHEN, James. *Manual de azúcar de caña*. p. 220.

Figura 12. Diagrama de telas de filtro banda



Fuente: Cordoba Industrial Ltda. *Filtro Vacuum Press*. p. 7.

2.4.2.1. Parámetros de control de filtros banda

De acuerdo al manual del filtro banda existen variables que deben de ser controladas rigurosamente para permitir el funcionamiento adecuado del filtro. Estas son:

- "pH Lodo:
Esta es la principal variable a ser controlada, pues ofrece al floculante un "ambiente ideal" para actuar. Dependiendo del floculante puede estar entre el rango del 7,5 a 8,5.
- Concentración de sólidos en la salida del decantador:
No se debe permitir que la concentración esté por debajo de 45 % (V/V), evitando de esta forma el arrastre de jugo junto al lodo, a fin de reducir el volumen a ser filtrado así como comprometer el desempeño del filtro.
- Concentración de sólidos en la caja de alimentación:
Un lodo diluido y correctamente floculado drena rápidamente permitiendo aumentar la razón de imbibición y producción del filtro. El control de la pre-dilución también debe realizarse a través de mediciones, manteniendo la concentración de sólidos en el lodo menores a 30 % V/V.

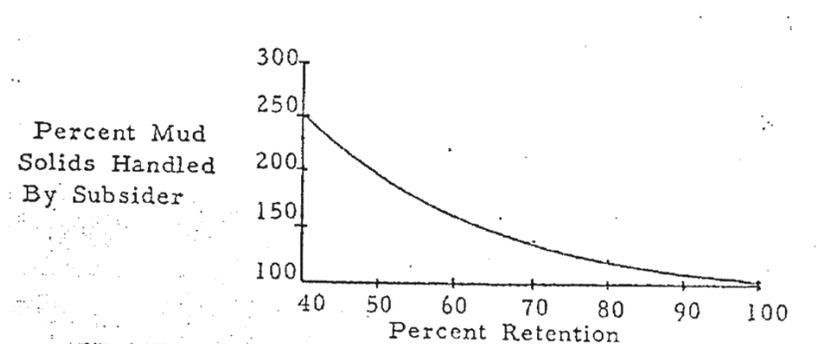
- Concentración de sólidos en el filtrado:
 “A través del resultado obtenido, será posible valorar la calidad del producto (jugo)”¹⁰.

2.4.3. Retención de filtros

“La retención se define como el porcentaje total de sólidos de lodo de la alimentación de filtros (excluyendo a la fibra) que es retenida en la torta de cachaza.”¹¹ Es importante que el filtro retenga la mayor cantidad posible de sólidos de lodo. En un sistema donde el filtrado se devuelve al jugo mezclado, y la retención en los filtros es solo el 50 % de la cantidad de sólidos de lodo que pasan a través de la estación de clarificación, pronto se acumula hasta que es el doble de la cantidad que entra con el jugo mezclado.

El siguiente gráfico muestra el efecto de la retención de la cantidad de lodo tratado por el equipo.

Figura 13. **Porcentaje de sólidos en el filtro en función del porcentaje de retención**



Fuente: Hulett's Sugar Limited. *Research and Development. Sugar Technology.* p. 63.

¹⁰ Cordoba Industrial Ltda. *Filtro Vacuum Press.* p.10-15.

¹¹ REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar.* p. 305.

"Existen factores importantes que influyen en la retención de filtro y son importantes mantenerlas controladas:

- Finura y cantidad de bagacillo añadido al lodo
- Concentración de sólidos de lodo
- Vacío de carga para el filtro
- Duración del período de formación de la torta"¹²

2.5. Pérdidas de sacarosa en fábrica

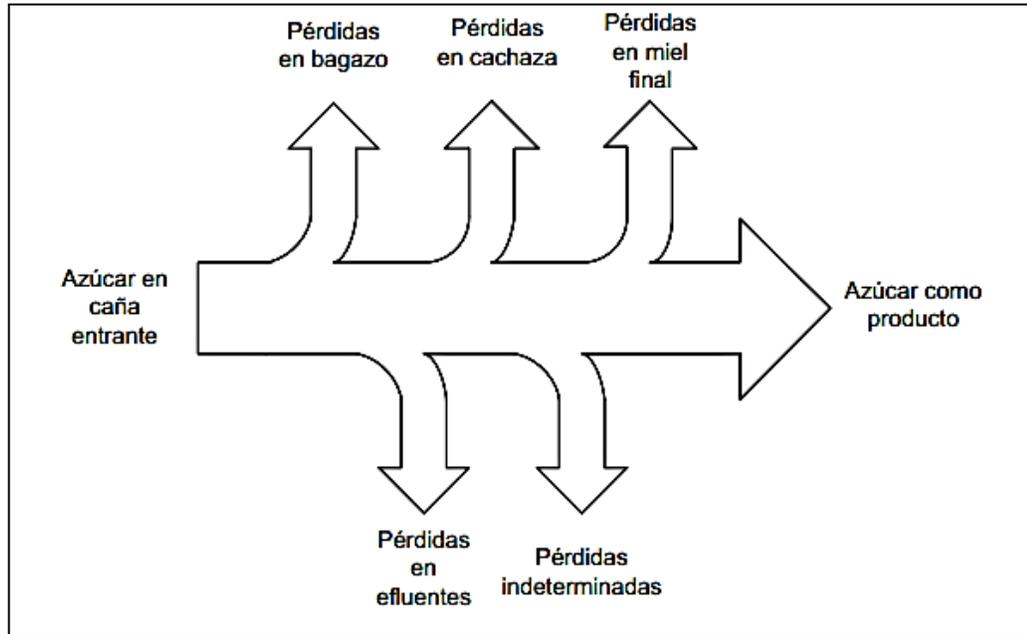
Las pérdidas de sacarosa ocurren desde el momento en que se corta la caña hasta cuando se envasa el azúcar; se presentan entre corte, alce y transporte y en las operaciones de fábrica como el lavado de caña, el bagazo resultante de las operaciones de preparación y molienda, en la cachaza proveniente de la limpieza de los jugos por medio de la clarificación y en las mieles.

Todas las pérdidas, en cualquier proceso azucarero, se clasifican en dos clases generales: "determinadas e indeterminadas". Las pérdidas determinadas son las que tienen lugar en el bagazo, la cachaza y en la miel final o melaza. "En cambio, las pérdidas indeterminadas son calculadas por un balance de masa, y resultan de la diferencia entre el total de sacarosa que llega en la caña y la sumatoria de la azúcar producida y las pérdidas determinadas. Las pérdidas indeterminadas se pueden clasificar en químicas, microbiológicas, y físicas."¹³

¹² Hulett's Sugar Limited. *Research and Development. Sugar Technology*. p. 63.

¹³ ESQUITE, Bryan. *Cuantificación de pérdidas de azúcar en los efluentes del proceso industrial de un ingenio azucarero*. p. 31.

Figura 14. **Representación de pérdidas de sacarosa en un ingenio**



Fuente: ESQUITE, Bryan. *Cuantificación de pérdidas de azúcar en los efluentes del proceso industrial de un ingenio azucarero*. p. 31.

2.5.1. **Pérdidas determinadas**

Estas pérdidas se determinan debido a los procedimientos establecidos en el laboratorio de fabricación de los ingenios. Las pérdidas en el bagazo se obtienen utilizando los análisis de Pol de bagazo (contenido aparente 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).

2.5.2. Pérdidas indeterminadas

Las pérdidas indeterminadas se calculan mediante la diferencia entre el total de sacarosa que llega en el jugo, la cantidad de ella que es cristalizada para ser convertida en azúcar y la cantidad de sacarosa calculada en las pérdidas determinadas, reduciéndose todo a un balance de masa. Estas pérdidas deben ser mínimas en todo ingenio operado eficientemente pero actualmente constituye en un serio problema económico para la industria azucarera.

2.5.2.1. 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.

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 considerable. La descomposición por estos factores puede darse principalmente en la clarificación y evaporación.

2.5.2.2. Pérdidas físicas

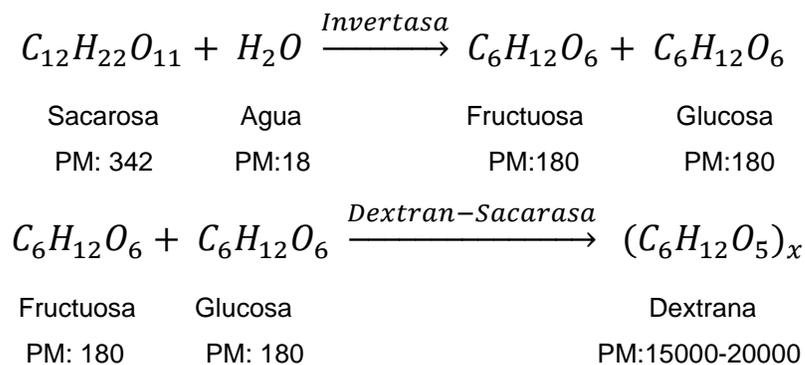
Estas están asociadas con fugas y desbordes de materiales intermedios o arrastres en condensados y en los efluentes del proceso fabril. Los altos niveles de material en la operación normal pueden ocasionar arrastre que contaminan el agua condensada con pérdidas de sacarosa.

2.5.2.3. Pérdidas microbiológicas

El jugo extraído ofrece un medio ideal para la propagación de microorganismos que causan la degradación de sacarosa. Cuando se procesa caña deteriorada o caña quemada atrasada, el desarrollo de la bacteria *Leuconostoc mesenteroides* es muy pronunciada tanto en los molinos, conductores de bagazo, coladores de jugo, tanques y canales de jugo, entre otros.

Esta bacteria polimeriza la sacarosa generando pérdidas económicas por la producción de dextrana, generando así también efectos perjudiciales al proceso de fabricación de azúcar.

Figura 15. **Reacción de inversión y formación de dextrana**



Fuente: RAIMBAULT, Maurice. *Impacto de la microbiología en la fabricación del azúcar*. p. 52.

La presencia de diferentes poblaciones de microorganismos también hidrolizan la sacarosa en sus monosacáridos primarios. Algunos autores mencionan que cuando el lodo no es eliminado en forma continua y eficiente, esta se fermenta por acción bacteriana produciéndose pérdidas indeterminadas

de sacarosa. Cualquier retención o acumulación de lodos tendrá como consecuencia una acidificación de jugo en los compartimientos inferiores.

“En realidad los azúcares invertidos son el producto intermedio de hidrólisis de la sacarosa y es el índice más empleado por la detección de pérdidas de azúcar.”¹⁴ Sin embargo, estos azúcares son utilizados por una gran variedad de microorganismos encontrados en los jugos que los requieren como fuente de carbono para desarrollarse y generar otros productos metabólicos como el etanol y ácidos orgánicos.

“Por esta razón se sugiere la cuantificación de otros productos finales del metabolismo como el ácido láctico, que son indicadores más precisos de pérdida de sacarosa por actividad microbiológica.”¹⁵ “Los niveles típicos de jugos filtrados deben de ser menores a 600 mg ácido láctico/kg sólidos disueltos.”¹⁶

2.6. Ácido láctico

El ácido láctico (ácido 2-hidroxipropiónico), con fórmula $C_3H_6O_3$, es el más simple ácido hidróxido conteniendo un átomo de carbón asimétrico, existente en dos formas ópticamente activas, un isómero de configuración L(+) que es el metabolizado por el organismo humano, y un isómero de configuración D(-) que no es metabolizado, ambos solubles en agua.

Este ácido está ampliamente distribuido en la naturaleza, es un constituyente primario del suero de la leche y un constituyente normal en la sangre y tejidos de los músculos de los animales.

¹⁴ RAIMBAULT, Maurice. *Impacto de la microbiología en la fabricación del azúcar*. p. 52.

¹⁵ REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. p. 311.

¹⁶ LIONNET G.R.E. *Mud filtration*. p. 185.

Tabla II. **Propiedades del ácido láctico**

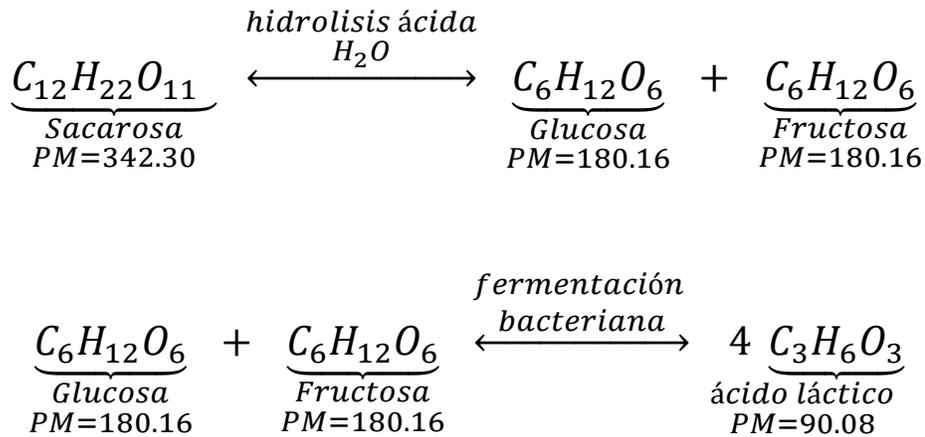
Fórmula	C₃H₆O₃
Peso molecular	90,08
Índice de refracción	1,4414
Punto de fusión	L(+) y D(-) 52,8 a 54 °C
Punto de ebullición	125-140 °C
Gravedad específica	1,206
Calor de combustión	3 616 cal/g
Viscosidad	40,33 mNsm ⁻²
Densidad	1,249 g/ml
Constante dieléctrica	22 ε

Fuente: RAIMBAULT, Maurice. *Impacto de la microbiología en la fabricación del azúcar*. p. 53.

El ácido láctico tiene un amplio rango de aplicaciones en la industria alimenticia, química, farmacéutica y cosmética, entre otras. Hoy en día, la producción biotecnológica de ácido láctico puede ser un proceso rentable si se utilizan materiales de bajo coste y son optimizadas las condiciones de fermentación.

El rendimiento teórico de ácido láctico a partir de sacarosa se presenta a continuación:

Figura 16. **Reacción de fermentación láctica**



Fuente: RAIMBAULT, Maurice. *Impacto de la microbiología en la fabricación del azúcar*. p. 53.

“En el área de filtros de cachaza el principal producto final de la fermentación de sacarosa por microorganismos es el láctico ácido. En dicha área, el contenido de ácido láctico es un indicador más preciso de pérdida de sacarosa (por actividad microbiológica) que la caída de pureza.”¹⁷

Pero la relación de fermentación de sacarosa a ácido láctico (en peso), en el área de filtración de cachaza, no tiene la proporción esperada teóricamente. “La tasa de conversión aproximada de sacarosa para láctico ácido, bajo condiciones del proceso de filtración en cada tecnología, es una parte de ácido láctico formado para cada dos partes de sacarosa fermentada a altas temperaturas, mostrando una relación 1:2.”¹⁸

¹⁷ REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar*. p. 311.

¹⁸ MCMASTER Y RAVNO. *Sucrose loss in diffusion with reference to thermophilic bacteria and lactic acid*. 1975.

Figura 17. **Relación en peso de sacarosa fermentada a ácido láctico**

Juice	pH	Brix	Percent decrease in Reducing Sugars	Sucrose Loss (gms)	Lactic Acid Formed (gms)	Sucrose/Lactic Acid Ratio
A	6,9	13,94	0,58	5,00	1,67	3
B	6,9	17,78	0,13	6,00	1,4	4,3
C	6,9	15,58	0,08	3,47	1,46	2,4
D	6,9	15,53	n.d.	2,57	3,35	0,77
E	6,1	7,6	0,04	1,81	1,15	1,57
F	6,1	7,6	n.d.	1,22	1,4	0,87

Key: n.d. — not determined

Fuente: MCMASTER Y RAVNO. *Sucrose loss in diffusion with reference to thermophilic bacteria and lactic acid*. p. 5.

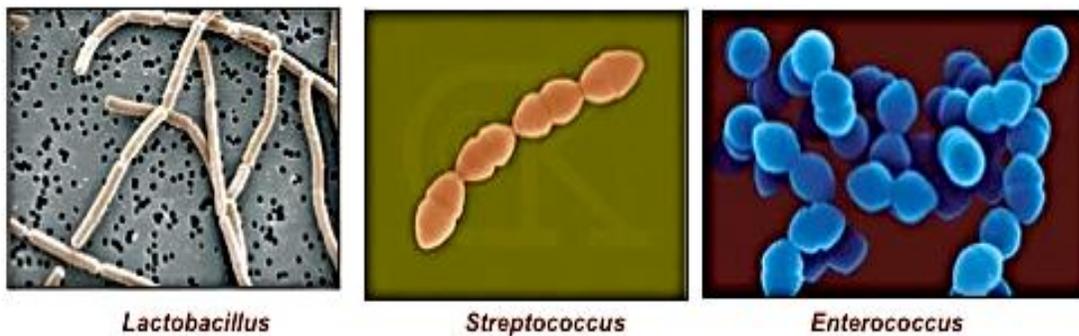
2.6.1. Bacterias lácticas

Las bacterias lácticas son un grupo de microorganismos representados por varios géneros con características morfológicas y metabólicas en común. En general las bacterias lácticas son cocos o bacilos Gram positivos, no esporulados, no móviles, anaeróbicos, microaerofílicos o aerotolerantes, carecen de citocromos y producen ácido láctico como el único o principal producto de la fermentación de carbohidratos. Además, son ácido tolerantes pudiendo crecer algunas a valores de pH tan bajos como 3,2, pero la mayoría crecen a pH entre 4- 5,5, permitiéndoles sobrevivir naturalmente en medios donde otras bacterias no aguantarían la aumentada actividad producida por los ácidos orgánicos.

La clasificación de las bacterias lácticas es basada en principio en la morfología, modo de fermentación de la glucosa, el crecimiento a diferentes temperaturas, la configuración de ácido láctico producida y su tolerancia ácida.

En la naturaleza existen los siguientes generos: *Lactobacillus*, *Leuconostoc*, *Pediococcus*, *Lactococcus*, y *Streptococcus* así como los *Lactobacillales* *Aerococcus*, *Carnobacterium*, *Enterococcus*, *Oenococcus*, *Vagococcus*, y *Weisella*. Pero los géneros más representativos son: *Lactobacillus*, *Pediococcus*, *Streptococcus* y *Leuconostoc*.

Figura 18. **Bacterias lácticas**



Fuente: La Rioja. <https://www.larioja.org/npRioja/default/defaultpage.jsp?idtab=791162>.
Consulta: agosto de 2015.

3. METODOLOGÍA

3.1. Variables

Las variables que tienen efecto sobre los resultados finales del tema de estudio fueron los siguientes:

3.1.1. Variables de análisis independientes

Son aquellas variables que pueden cambiar libremente su valor y se conocen al inicio del experimento.

Tabla III. **Determinación de variables independientes**

VARIABLES INDEPENDIENTES	
Variable	Unidad
Flujo de lodo alimentado	gpm
Temperatura del lodo	°C
Flujo de Agua	gpm
Flujo de floculante	gpm
Velocidad de filtro	Revoluciones/min

Fuente: elaboración propia.

3.1.2. Variables de análisis dependientes

Son aquellas variables cuyo valor depende del valor numérico que adopta la variable independiente durante el experimento.

Tabla IV. **Determinación de variables dependientes**

VARIABLES DEPENDIENTES	
Variable	Unidad
Pol	% m/m
Grados Brix	% m/m
Humedad	% BS
pH	--
Retención	% m/m
Ácido láctico	ppm
Conteo microbiológico	UFC/g

Fuente: elaboración propia.

3.1.3. **Variables constantes**

Son aquellas variables que se mantienen controladas de manera que no afecten a la variable dependiente.

Tabla V. **Determinación de las variables constantes**

VARIABLES CONSTANTES	
Variabes	Unidades
Presión	mm Hg
Temperatura de agua	°C
Área de filtración	m ²

Fuente: elaboración propia.

3.2. Delimitación del campo de estudio

El estudio se llevó a cabo durante la zafra 2014-2015, con apoyo del programa de Investigación Industrial del Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar (Cengicaña) ubicado en el km 92,5, finca Camantulul, Santa Lucía Cotzumalguapa, Escuintla, Guatemala.

3.2.1. Obtención de materia prima

La toma de muestras se realizó en el área de Clarificación y Filtración de cachaza de tres ingenios guatemaltecos durante la zafra 2014-2015. Los ingenios se denotaron como Ingenio A, B y C, donde los Ingenios A y B cuentan con ambas tecnologías de filtración de cachaza (rotativo y banda) mientras que el Ingenio C trabaja únicamente con tecnología banda. El estudio consistió en tomar muestras de jugo clarificado, lodo caliente, jugo filtrado y cachaza de filtros rotativos y banda, agregándoles inmediatamente bactericida (Carbamato) para evitar la proliferación de bacterias.

3.2.2. Análisis fisicoquímicos de las muestras

A las muestras recolectadas se le analizaron los siguientes parámetros: Grados Brix, Pol, pH de todas las corrientes, humedad en las dos cachazas y ácido láctico de los jugos y lodo caliente. En conjunto al análisis de dichas muestras, se determinaron las retenciones de lodos en los filtros de banda y rotativo.

Los análisis de recuento total de mesófilos y termófilos y coeficientes microbiológicos fueron realizados por el Laboratorio de la empresa Optimisa, con el apoyo del Lic. Osbel Nuñez.

3.2.3. Métodos analíticos

Los métodos analíticos utilizados para analizar las muestras dentro del laboratorio de cada uno de los ingenios visitados o en el Laboratorio Agronómico de Cengicaña fueron los siguientes:

Tabla VI. **Métodos analíticos utilizados para el estudio de pérdidas de sacarosa en filtros de cachaza**

Análisis	Método	Ingenio
Grados Brix, Pol, pH	Metodologías ICUMSA .	Ingenio A, B y C
Humedad	Balanza Infrarrojo; Método de finalización automática A60.	Ingenio A, B y C
Ácido láctico*	Método de Espectroscopia Ultravioleta-Visible (UV) - Roche. Para la determinación de ácido D- y L-láctico en alimentos y otros materiales. R-BIOPHARM.	Ingenio A
Ácido láctico*	Método Reflectométrico - Reflectoquant RQflex10. Para la determinación de ácido láctico total (suma de D y L-láctico). Merck.	Ingenio B y C
	Cromatografía líquida de alta eficacia (HPLC). Columna HPLC para ácidos orgánicos, Hi-Plex H 300 x 7.7 mm.	Ingenio A y C
Retención	Metodología propuesta por Peter Rein.	Ingenio A, B y C

* En el caso del análisis del ácido láctico las muestras tuvieron que recibir un pretratamiento adecuado antes de aplicar la metodología correspondiente.

Fuente: elaboración propia.

Por último, las mediciones realizadas fueron promediadas por día y en conjunto a una serie de datos de corrientes que cada uno de los ingenios

proporcionó; se pudo cuantificar las pérdidas promedio de sacarosa generadas por actividad microbiológica, recirculación de lodos y agotamiento de cachaza.

3.3. Recursos humanos disponibles

- Investigadora: Raisa Alejandra Vega Manzo
- Asesor: Ing. *Byron de Jesús López Maldonado*
- Analista de Laboratorio: Abel Danilo Palma

3.4. Recursos físicos

Los recursos materiales para los análisis fueron proporcionados por el Centro Guatemalteco de Investigación y Capacitación de la Caña de Azúcar (Cengicaña) y los laboratorios de fábrica de cada uno de los ingenios.

3.4.1. Muestras y reactivos

El laboratorio cuenta con reactivos que se utilizan comúnmente para los análisis de las muestras de los materiales del proceso de fabricación de azúcar. La tabla VII muestra los reactivos y la materia prima utilizada en los análisis de laboratorio.

Tabla VII. **Muestras y reactivos**

Muestras	Jugo clarificado
	Jugo filtrado
	Lodo
	Cachaza
Reactivos	Agua desmineralizada
	Estándar de ácido láctico, Pureza ≥ 85 %, BIOKIM
	Hidróxido de sodio grado reactivo, 99 % marca Merck
	Ácido clorhídrico grado reactivo, 37 % marca Merck

Fuente: elaboración propia.

3.4.2. Instrumentos de medición, cristalería, equipo auxiliar y materiales diversos

El laboratorio cuenta con varios equipos y cristalería necesarios para realizar los análisis a los distintos materiales del proceso de fabricación de azúcar. La tabla VIII muestra los instrumentos de medición, cristalería, equipo auxiliar y materiales diversos utilizados en la fase experimental.

Tabla VIII. **Instrumentos de medición y equipo auxiliar**

Instrumentos de medición	Balanza Infrarrojo, marca "OHAUS" serie MB 45-20
	HPLC, marca "Agilent" serie 1290 Infinity
	Reflectómetro Reflectoquant RQflex10 marca "Merck"
	Balanza Analítica, marca "AND" serie EJ-610
	Potenciómetro, "Orion" Serie 3-Star
	Polarímetro, marca "Schmidt+Hansch" modelo NIR40
	Refractómetro, marca "Schmidt + Hansch"
	Espectrofotómetro UV, marca "Thermo Scientific", serie Genesis.
Equipo auxiliar	Bomba de vacío, marca "Welch 1400", de 1/3 HP
	Centrífuga, marca "IEC Centra MP4"
	Tubos de centrifuga plásticos (Falcon) de 50 ml y 15 ml.
	Pipetas automáticas de [100 – 1 000] μL y [10 –50] μL .
Cristalería	Beakers de 250 ml
	Celdas de 1 cm
	Kitasato
	Pipetas serológicas de 2 y 10 ml
	Pipeta volumétrica de 1 ml
	Balón aforado de 100 ml
Materiales diversos	Filtros de 10, 0,45 y 0,2 μm
	Espátulas metálicas
	Embudos plásticos
	Tubos de ensayo plásticos de 5 ml y 10 ml
	Botes plásticos con tapadera
	Pizeta
	Agitadores magnéticos

Fuente: elaboración propia.

3.5. Técnica cualitativa o cuantitativa

La técnica del estudio de investigación es cuantitativa y analítica, la misma permite examinar los datos de forma numérica y establecer relaciones entre las variables para probar o negar la hipótesis planteada.

3.6. Recolección y ordenamiento de la información

Una vez definidas las variables del estudio de investigación, tanto dependientes como independientes, se procedió a realizar la parte experimental del proyecto, así como la recolección y ordenamiento de la información.

Para el análisis de ácido láctico de las muestras se utilizará un esquema completamente al azar con un arreglo combinatorio, en el cual se determinará la concentración de ácido láctico del área de clarificación con 1 corriente de análisis (jugo claro), y del área de filtración en función de 2 filtros de cachaza (filtro rotativo y de banda) con sus 2 corrientes de proceso (lodo alimentado y jugos filtrados), analizados con alguno de los 2 métodos de cuantificación (*kits* enzimáticos y *kits reflectoquants*) y comparados contra el HPLC.

Por lo tanto se tendrán 4 tratamientos, sin repeticiones, con 18 corridas, para dar un total de 72 unidades experimentales por ingenio aproximadamente.

Tabla IX. **Recolección de datos de jugo claro, Ingenio A**

MUESTRA	CORRIDA	pH [adimensional]	GRADOS BRUX [%]	POL [%]	PUREZA [%]	AC LACT KIT [ppm]	AC LACT HPLC [ppm]
JUGO CLARO	1	6,94	14,68	12,56	85,56	58,70	
	2	6,91	14,86	12,72	85,60	82,57	
	3	6,99	14,08	11,96	84,94	116,71	134,68
	4	7,32	13,23	11,26	85,11	131,13	
	5	7,48	14,21	12,10	85,15	116,58	164,18
	6	7,35	14,35	12,14	84,60	74,10	
	7	7,35	12,88	10,98	85,25	80,27	125,11
	8	7,20	13,70	11,82	86,28	68,31	
	9	6,99	12,60	10,96	86,98	70,68	
	10	6,90	14,40	12,6	87,50	63,94	158,98
	11	6,80	14,00	12,24	87,43	63,91	
	12	6,94	11,80	10,48	88,81	57,70	
	13	6,82	13,70	11,98	87,45	87,93	
	14	7,16	12,30	10,86	88,29	99,68	111,57
	15	7,16	14,10	12,28	87,09	64,78	
	16	7,20	13,70	12,04	87,88	84,41	101,49
	17	7,44	13,00	11,18	86,00	53,90	
	18	7,78	13,30	11,96	89,92	121,59	142,47

Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio A, 2015.

Tabla X. **Recolección de datos de lodo, Ingenio A**

MUESTRA	CORRIDA	pH [adimensional]	GRADOS BRUX [%]	POL [%]	PUREZA [%]	AC LACT KIT [ppm]	AC LACT HPLC [ppm]
LODO	1	7,67	13,48	11,0	81,60	47,07	
	2	7,42	11,64	9,70	83,33	84,79	
	3	7,44	10,76	9,16	85,13	101,19	297,33
	4	8,79	13,33	10,48	78,62	98,01	
	5	7,64	12,64	9,08	71,84	103,73	135,58
	6	7,07	13,14	9,54	72,60	83,16	
	7	2,23	12,07	10,10	83,68	79,93	113,91
	8	7,30	11,20	9,42	84,11	64,73	
	9	7,48	12,8	10,56	82,50	68,75	
LODO	10	7,13	14,1	12,02	85,25	59,07	79,38
	11	7,24	12,0	10,12	84,33	49,78	
	12	7,45	12,4	10,48	84,52	59,04	
	13	7,43	10,4	8,86	85,19	60,63	
	14	7,45	10,4	9,08	87,31	94,79	133,98
	15	7,76	12,0	10,30	85,83	64,11	
	16	7,47	11,6	10,02	86,38	65,13	104,28
	17	7,56	10,0	8,42	84,20	94,54	
	18	7,72	11,2	9,64	86,07	67,14	71,35

Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio A, 2015.

Tabla XI. **Recolección de datos de jugo filtrado de filtro rotativo, Ingenio A**

MUESTRA	CORRIDA	pH [adimensional]	GRADOS BRUX [%]	POL [%]	PUREZA [%]	AC LACT KIT [ppm]	AC LACT HPLC [ppm]
JUGO FILTRADO ROTATIVO	1	6,75	12,09	10,02	82,88	670,61	
	2	7,92	11,84	10,00	84,46	931,70	
	3	7,26	11,34	9,46	83,42	1 001,44	953,61
	4	6,97	11,15	9,54	85,56	566,58	
	5	11,54	9,24	7,36	79,65	1 184,86	1 042,18
	6	8,35	11,32	9,70	85,69	333,30	
	7	8,32	10,62	8,84	83,24	239,27	255,89
	8	7,48	9,30	7,96	85,59	346,35	
	9	6,85	9,50	7,88	82,95	1 275,60	
	10	7,56	11,40	9,70	85,09	400,92	577,82
	11	6,68	11,20	9,62	85,89	593,07	
	12	6,43	9,20	7,92	86,09	610,59	
	13	6,17	10,80	9,30	86,11	498,04	
	14	8,44	11,70	9,98	85,30	558,54	613,11
	15	7,86	11,40	9,60	84,21	486,89	
	16	7,43	10,50	9,22	87,81	458,65	513,87
	17	6,83	9,10	7,64	83,96	565,88	
	18	6,65	9,10	8,20	90,11	423,87	443,49

Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio A, 2015.

Tabla XII. **Recolección de datos de jugo filtrado de filtro banda, Ingenio A**

MUESTRA	CORRIDA	pH [adimensional]	GRADOS BRUX [%]	POL [%]	PUREZA [%]	AC LACT KIT [ppm]	AC LACT HPLC [ppm]
JUGO FILTRADO BANDA	1	9,37	10,59	8,48	80,08	141,13	
	2	8,10	12,97	10,56	81,42	97,37	
	3	7,76	12,12	9,80	80,86	130,84	144,82
	4	11,69	12,50	9,68	77,44	123,50	
	5	10,27	11,89	9,68	81,41	200,55	236,81
	6	10,17	12,54	10,26	81,82	230,73	
	7	9,74	9,24	7,72	83,55	76,16	98,93
	8	9,81	8,60	7,38	85,81	35,13	
	9	9,18	13,70	11,62	84,82	134,15	
	10	8,26	13,10	10,84	82,75	45,86	95,00
	11	7,04	12,60	10,86	86,19	80,99	
	12	9,52	10,80	9,36	86,67	86,43	
	13	9,75	9,50	8,20	86,32	98,92	
	14	7,28	11,80	10,24	86,78	109,92	116,27
	15	9,18	10,80	9,30	86,11	80,52	
	16	8,82	11,50	9,82	85,39	49,29	130,27
	17	7,92	6,90	5,84	84,64	41,63	
	18	8,30	7,90	7,08	89,62	62,28	68,99

Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio A, 2015.

Tabla XIII. **Recolección de datos de cachaza filtro rotativo, Ingenio A**

MUESTRA	CORRIDA	HUMEDAD [%]	pH [adimensional]	GRADOS BRIX [%]	POL [%]	PUREZA [%]
CACHAZA FILTRO ROTATIVO	1	71,02	8,32	10,56	7,76	73,48
	2	72,30	9,56	7,96	6,52	81,91
	3	68,38	9,70	8,08	6,08	75,25
	4	73,36	8,59	7,34	5,90	80,38
	5	73,64	11,42	8,24	6,08	73,79
	6	71,71	9,04	9,84	7,62	77,44
	7	73,69	8,71	7,04	5,28	75,00
	8	72,75	8,71	8,00	5,64	70,50
	9	74,75	7,57	5,60	4,52	80,71
CACHAZA FILTRO ROTATIVO	10	73,18	9,05	7,20	5,74	79,72
	11	72,84	9,53	8,40	6,10	72,62
	12	71,69	8,21	6,00	4,88	81,33
	13	74,23	7,19	7,60	5,44	71,58
	14	70,33	9,68	7,60	5,92	77,89
	15	70,16	9,43	8,80	6,90	78,41
	16	71,23	9,07	7,60	6,08	80,00
	17	77,60	7,79	4,80	3,56	74,17
	18	75,35	7,93	6,00	4,90	81,67

Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio A, 2015.

Tabla XIV. **Recolección de datos de cachaza filtro banda, Ingenio A**

MUESTRA	CORRIDA	HUMEDAD [%]	pH [adimensional]	GRADOS BRIX [%]	POL [%]	PUREZA [%]
CACHAZA FILTRO BANDA	1	67,61	8,89	10,72	8,64	80,60
	2	61,76	7,95	10,12	8,26	81,62
	3	63,27	7,84	7,56	6,20	82,01
	4	63,54	11,88	11,64	7,80	67,01
	5	64,87	10,63	10,48	8,04	76,72
	6	62,14	9,8	10,64	8,38	78,76
	7	65,53	9,59	7,12	5,76	80,90
	8	65,28	9,64	6,80	5,60	82,35
	9	60,78	8,48	7,20	5,94	82,50
	10	69,19	8,43	10,40	8,54	82,12
	11	62,75	7,51	9,60	8,12	84,58
	12	65,31	9,6	10,10	8,16	81,60
	13	65,60	9,82	9,67	7,74	80,63
	14	62,48	7,64	10,00	7,92	79,20
	15	64,83	9,59	9,76	7,12	74,17
	16	61,20	9,19	10,06	7,82	78,20
	17	68,18	8,10	6,80	5,34	78,53
	18	67,96	8,54	5,60	4,22	75,36

Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio A, 2015.

Tabla XV. **Recolección de datos de jugo claro, Ingenio B**

MUESTRA	CORRIDA	pH [adimensional]	GRADOS BRIX [%]	POL [%]	PUREZA [%]	AC LACT KIT [ppm]
JUGO CLARO	1	6,41	14,30	12,30	86,01	100,00
	2	6,87	13,40	11,33	84,55	103,00
	3	6,81	13,00	11,03	84,85	92,00
	4	6,78	13,40	11,31	84,40	95,00
	5	6,82	13,20	11,38	86,21	107,00
	6	6,57	14,15	12,29	86,86	132,00
	7	6,87	14,25	12,14	85,19	150,00
	8	7,20	15,80	13,84	87,59	115,00
	9	7,66	14,20	12,47	87,82	110,00
	10	6,79	14,00	12,23	87,36	91,00
	11	6,91	13,10	11,41	87,10	79,00
	12	6,64	13,95	11,99	85,95	68,00
	13	6,49	13,40	11,62	86,72	87,00
	14	6,71	13,00	11,27	86,69	73,00
	15	7,28	13,30	11,46	86,17	102,00
	16	6,65	13,70	11,65	85,04	87,00
	17	6,48	14,20	12,05	84,86	78,00
	18	6,55	14,45	12,51	86,57	84,00

Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio B, 2015.

Tabla XVI. **Recolección de datos de lodo, Ingenio B**

MUESTRA	CORRIDA	pH [adimensional]	GRADOS BRIX [%]	POL [%]	PUREZA [%]	AC LACT KIT [ppm]
LODO	1	7,27	13,20	10,88	82,42	82,80
	2	7,04	11,60	9,45	81,47	67,20
	3	10,24	10,00	8,19	81,90	80,81
	4	10,36	10,00	8,22	82,20	78,43
	5	11,38	10,40	8,66	83,27	101,32
	6	7,35	12,80	10,90	85,16	96,00
	7	7,33	11,16	9,36	83,87	106,80
	8	7,40	16,40	14,08	85,85	104,40
	9	7,32	14,80	12,88	87,03	122,40
	10	7,06	13,60	11,51	84,63	45,60
	11	7,33	12,20	10,31	84,51	19,56
	12	7,13	13,20	10,81	81,89	52,80
	13	6,97	12,40	10,37	83,63	52,80
LODO	14	7,05	11,60	9,83	84,74	46,80
	15	6,99	11,20	9,22	82,32	60,00
	16	7,11	12,20	10,17	83,36	57,60
	17	7,04	11,60	9,56	82,41	52,80
	18	7,08	12,40	10,49	84,60	80,40

Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio B, 2015.

Tabla XVII. **Recolección de datos de jugo filtrado de filtro rotativo, Ingenio B**

MUESTRA	CORRIDA	pH [adimensional]	GRADOS BRIX [%]	POL [%]	PUREZA [%]	AC LACT KIT [ppm]
JUGO FILTRADO ROTATIVO	1	6,01	11,60	9,42	81,21	525,00
	2	6,26	11,60	9,20	79,31	560,00
	3	6,35	8,00	6,46	80,75	530,00
	4	6,20	8,80	6,87	78,07	680,00
	5	6,29	9,20	7,36	80,00	585,00
	6	8,94	7,15	5,89	82,38	1 980,00
	7	5,61	8,80	7,06	80,23	1 780,00
	8	6,77	15,40	12,65	82,14	435,00
	9	6,45	12,60	10,63	84,37	710,00
	10	6,2	10,30	8,53	82,82	595,00
	11	6,48	9,55	7,95	83,25	335,00
	12	6,31	10,30	8,17	79,32	565,00
	13	6,30	9,50	7,48	78,74	455,00
	14	6,31	9,60	7,75	80,73	555,00
	15	6,10	10,00	8,01	80,10	710,00
	16	6,22	10,15	8,23	81,08	570,00
	17	6,17	11,00	8,96	81,45	730,00
	18	6,22	14,65	12,17	83,07	715,00

Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio B, 2015.

Tabla XVIII. **Recolección de datos de jugo filtrado de filtro banda, ingenio B**

MUESTRA	CORRIDA	pH [adimensional]	GRADOS BRIX [%]	POL [%]	PUREZA [%]	AC LACT KIT [ppm]
JUGO FILTRADO BANDA	1	10,64	7,20	6,08	84,44	130,04
	2	11,44	5,40	4,23	78,33	305,81
	3	11,22	5,20	4,24	81,54	85,74
	4	11,64	4,90	3,94	80,41	222,92
	5	11,48	5,60	4,58	81,79	254,36
	6	5,84	8,63	7,21	83,55	325,81
	7	11,53	6,60	5,28	80,00	447,28
	8	11,03	9,90	8,37	84,55	210,06
	9	11,55	8,10	6,53	80,62	385,83
	10	11,06	5,20	4,37	84,04	61,45
	11	11,01	5,10	4,14	81,18	51,44
	12	10,38	4,90	3,99	81,43	81,45
	13	10,19	4,60	3,88	84,35	46,00
	14	10,01	4,60	3,84	83,48	55,00
	15	7,31	5,40	4,57	84,63	71,00
	16	10,57	4,70	3,82	81,28	61,45
	17	10,67	0,00	0,00	0,00	95,76
	18	11,78	4,68	3,79	80,98	85,74

Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio B, 2015.

Tabla XIX. **Recolección de datos de cachaza filtro rotativo, Ingenio B**

MUESTRA	CORRIDA	HUMEDAD [%]	pH [adimensional]	GRADOS BRUX [%]	POL [%]	PUREZA [%]
CACHAZA FILTRO ROTATIVO	1	71,75	7,26	8,40	6,18	73,57
	2	73,12	7,02	8,40	5,18	61,67
	3	75,24	7,53	7,20	4,26	59,17
	4	74,18	7,44	6,80	4,65	68,38
	5	74,65	7,74	6,00	4,16	69,33
	6	72,91	6,74	5,40	3,72	68,89
	7	72,53	6,51	6,00	4,18	69,67
	8	72,68	7,63	11,60	8,96	77,24
	9	71,77	7,43	6,40	5,24	81,88
	10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	11	73,22	7,71	5,60	3,99	71,25
	12	73,67	7,43	7,00	4,79	68,43
	13	75,67	7,34	5,60	4,27	76,25
CACHAZA FILTRO ROTATIVO	14	76,78	7,26	4,80	3,49	72,71
	15	72,88	7,48	8,80	6,28	71,36
	16	73,86	7,38	6,60	4,01	60,76
	17	71,18	7,33	10,00	6,02	60,20
	18	69,55	7,30	12,00	9,48	79,00

Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio B, 2015.

Tabla XX. **Recolección de datos de cachaza filtro banda, ingenio B**

MUESTRA	CORRIDA	HUMEDAD [%]	pH [adimensional]	GRADOS BRUX [%]	POL [%]	PUREZA [%]
CACHAZA FILTRO BANDA	1	74,33	10,87	2,00	1,48	74,00
	2	75,01	11,76	1,60	0,90	56,25
	3	76,41	11,22	1,60	0,83	51,88
	4	75,08	12,19	1,20	0,80	66,67
	5	76,76	12,08	2,40	1,44	60,00
	6	76,09	7,80	2,00	1,48	74,00
	7	76,23	11,77	2,40	1,48	61,67
	8	73,03	11,08	4,00	2,97	74,25
	9	72,76	12,15	2,00	1,45	72,50
	10	70,88	10,88	2,40	1,81	75,42
	11	75,70	10,94	2,00	1,41	70,50
	12	74,19	10,51	2,80	1,99	71,07
	13	75,07	10,25	2,00	1,44	72,00
	14	75,11	10,18	2,40	1,66	69,17
	15	70,86	11,97	5,20	3,28	63,08
	16	77,66	10,71	1,20	0,79	65,83
	17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	18	73,15	9,9	2,00	1,46	73,00

Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio B, 2015.

Tabla XXI. **Recolección de datos de jugo claro, Ingenio C**

MUESTRA	CORRIDA	pH [adimensional]	GRADOS BRIX [%]	POL [%]	PUREZA [%]	AC LACT KIT [ppm]	AC LACT HPLC [ppm]
JUGO CLARO	1	6,71	12,80	11,02	86,09	282,00	
	2	6,65	13,30	11,34	85,26	96,00	
	3	6,73	12,40	10,68	86,13	70,00	118,18
	4	6,67	12,80	10,93	85,39	113,00	86,27
	5	6,93	12,20	10,32	84,59	131,00	140,89
JUGO CLARO	6	6,84	13,80	11,64	84,35	93,00	95,82
	7	7,04	13,10	11,51	87,86	63,00	
	8	6,98	13,20	11,59	87,80	61,00	75,63
	9	7,18	13,80	11,90	86,23	48,00	78,04
	10	7,28	13,00	11,33	87,15	62,00	
	11	7,11	13,10	11,20	85,50	63,00	
	12	6,90	11,40	9,43	82,72	90,00	84,75
	13	7,08	10,90	9,21	84,50	56,00	68,04
	14	6,99	11,80	9,95	84,32	112,00	
	15	7,13	11,90	10,19	85,63	69,00	
	16	6,77	12,00	10,29	85,75	85,00	

Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio C, 2015.

Tabla XXII. **Recolección de datos de lodo, Ingenio C**

MUESTRA	CORRIDA	pH [adimensional]	GRADOS BRIX [%]	POL [%]	PUREZA [%]	AC LACT KIT [ppm]	AC LACT HPLC [ppm]
LODO CALIENTE	1	6,54	8,90	7,51	84,38	-	
	2	7,05	12,80	10,41	81,33	151,20	
	3	7,29	11,60	9,76	84,14	38,40	51,17
	4	7,2	12,00	10,03	83,58	54,00	96,20
	5	6,98	10,80	8,91	82,50	194,40	231,34
	6	7,09	9,60	7,99	83,23	100,80	134,96
	7	7,05	11,60	9,88	85,17	63,60	
	8	7,11	10,40	8,90	85,58	36,00	41,83
	9	7,13	10,70	9,60	89,72	102,00	110,90
	10	7,07	10,80	8,99	83,24	252,00	
	11	7,34	11,60	9,66	83,28	31,30	
	12	7,16	11,20	8,99	80,27	50,40	65,95
	13	7,17	10,00	8,22	82,20	118,80	120,90
	14	7,34	10,60	8,86	83,58	99,60	
	15	7,19	10,40	8,71	83,75	133,20	
	16	7,14	11,60	9,74	83,97	62,40	

Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio C, 2015.

Tabla XXIII. **Recolección de datos de jugo filtrado de filtro banda, Ingenio C**

MUESTRA	CORRIDA	pH [adimensional]	GRADOS BRIX [%]	POL [%]	PUREZA [%]	AC LACT KIT [ppm]	AC LACT HPLC [ppm]
JUGO FILTRADO	1	6,51	6,33	5,19	81,95	420,13	
	2	6,76	10,40	8,40	80,77	201,49	
	3	8,91	6,00	4,95	82,50	125,75	124,10
	4	6,08	10,90	8,79	80,64	41,00	629,64
	5	6,58	8,60	6,88	80,00	258,65	220,58
	6	9,28	5,40	4,48	82,96	108,60	106,77
	7	10,14	5,50	4,51	82,00	122,89	
	8	10,02	6,40	5,37	83,91	94,31	87,19
	9	9,74	7,90	6,53	82,66	332,96	349,42
	10	9,98	10,70	8,57	80,09	385,83	
	11	7,50	5,20	4,16	80,00	62,88	
	12	10,44	4,60	3,53	76,74	132,90	124,36
	13	10,57	6,30	5,11	81,11	434,42	458,42
	14	10,82	4,90	3,86	78,78	245,79	
	15	10,67	6,00	4,93	82,17	347,25	
	16	7,41	5,70	4,69	82,28	95,74	

Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio C, 2015.

Tabla XXIV. **Recolección de datos de cachaza filtro banda núm.1, Ingenio C**

MUESTRA	CORRIDA	HUMEDAD [%]	pH [adimensional]	GRADOS BRIX [%]	POL [%]	PUREZA [%]
CACHAZA BANDA 1	1	69,78	7,24	3,20	1,72	53,75
	2	69,34	7,42	3,60	2,51	69,72
	3	70,51	9,20	2,40	1,42	59,17
	4	70,18	6,97	3,60	2,76	76,67
	5	68,13	7,36	2,40	1,63	67,92
	6	68,91	9,74	2,00	1,24	62,00
	7	70,52	10,39	1,60	1,03	64,38
	8	70,34	10,42	2,00	1,41	70,50
	9	69,10	9,94	2,80	1,95	69,64
	10	69,18	10,63	3,60	2,49	69,17
	11	71,07	7,82	3,20	1,95	60,94
	12	68,66	10,78	0,80	0,47	58,75
	13	68,67	10,91	2,80	1,76	62,86
	14	68,35	10,89	2,80	1,62	57,86
	15	68,11	10,95	1,60	1,25	78,13
	16	69,91	7,76	2,00	1,06	53,00

Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio C, 2015.

Tabla XXV. **Recolección de datos de cachaza filtro banda núm.2, Ingenio C**

MUESTRA	CORRIDA	HUMEDAD [%]	pH [adimensional]	GRADOS BRUX [%]	POL [%]	PUREZA [%]
CACHAZA BANDA 2	1	70,16	7,32	2,80	1,41	50,36
	2	68,63	7,48	3,20	2,17	67,81
	3	70,23	9,22	1,60	1,02	63,75
	4	68,72	7,00	3,20	2,24	70,00
	5	71,33	7,34	2,00	1,29	64,50
	6	69,66	9,78	1,20	0,88	73,33
	7	66,31	10,37	1,20	0,67	55,83
	8	69,13	10,41	2,40	1,53	63,75
	9	68,85	10,02	2,00	1,34	67,00
	10	68,34	10,56	3,20	2,09	65,31
	11	69,32	7,82	2,80	1,34	47,86
	12	70,91	10,84	1,60	0,69	43,13
	13	0	0	0,00	0,00	0,00
	14	0	0	0,00	0,00	0,00
	15	0	0	0,00	0,00	0,00
	16	71,17	7,74	2,40	1,15	47,92

Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio C, 2015.

Tabla XXVI. **Recolección de datos de cachaza filtro banda núm.3, Ingenio C**

MUESTRA	CORRIDA	HUMEDAD [%]	pH [adimensional]	GRADOS BRUX [%]	POL [%]	PUREZA [%]
CACHAZA BANDA 3	1	68,97	7,28	3,60	1,97	54,72
	2	69,88	7,4	4,80	3,11	64,79
	3	68,85	9,23	2,80	1,52	54,29
	4	66,3	6,95	4,40	3,23	73,41
	5	66,69	7,26	3,20	2,22	69,38
	6	67,81	9,71	2,00	1,41	70,50
	7	66,99	10,36	2,00	1,44	72,00
	8	68,98	10,40	2,80	1,81	64,64
	9	67,85	9,88	2,80	1,86	66,43
	10	68,73	10,49	4,00	2,68	67,00
	11	68,52	7,80	3,60	1,86	51,67
	12	60,53	10,77	2,80	1,09	38,93
	13	67,64	10,97	2,40	1,62	67,50
	14	66,12	11,04	2,20	1,44	65,45
	15	66,74	10,9	1,20	0,91	75,83
	16	67,71	7,74	2,00	0,99	49,50

Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio C, 2015.

3.7. Tabulación, ordenamiento y procesamiento de la información

En función de la recolección y ordenamiento de los resultados obtenidos en la parte experimental, se procedió a tabular y procesar la información obtenida con el fin de ordenar los datos y poder interpretar los valores.

Las mediciones realizadas fueron promediadas por día y en conjunto a una serie de datos de corrientes que cada uno de los ingenios proporcionó, se pudo cuantificar las pérdidas promedio de sacarosa generadas por actividad microbológica, recirculación de lodos y agotamiento de cachaza.

Tabla XXVII. Tabulación y ordenamiento de datos del Ingenio A

MUESTRA	DIA	HUMEDAD [%]	pH [adimensional]	GRADOS BRIX [%]	POL [%]	PUREZ A [%]	AC LACT KIT [ppm]	AC LACT HPLC [ppm]
JUGO CLARO	1		6,94	14,68	12,56	85,56	58,70	-
	2		6,95	14,47	12,34	85,27	99,64	134,68
	3		7,42	14,28	12,12	84,88	95,34	164,18
	4		7,27	13,29	11,40	85,76	74,29	125,11
	5		6,90	13,67	11,93	87,30	66,18	158,98
	6		6,97	12,60	11,11	88,18	81,77	111,57
	7		7,18	13,90	12,16	87,49	74,59	101,49
	8		7,61	13,15	11,57	87,96	87,74	142,47
	PROMEDIO		7,16	13,75	11,90	86,55	79,78	134,07
	DESVIACIÓN ESTANDAR		0,26	0,72	0,50	1,32	14,09	23,26
LODO CALIENTE	1		7,67	13,48	11	81,60	47,07	-
	2		7,43	11,20	9,43	84,23	92,99	237,33
	3		7,83	13,04	9,7	84,35	94,97	135,58
	4		7,77	11,64	9,76	83,89	72,33	113,91
	5		7,28	12,97	10,9	84,03	59,20	79,38
	6		7,44	11,07	9,47	85,67	71,49	133,98
	7		7,62	11,80	10,16	86,11	64,62	104,28
	8		7,64	10,60	9,03	85,14	80,84	71,35
	PROMEDIO		7,59	11,97	9,93	84,38	72,94	125,12
	DESVIACIÓN ESTANDAR		0,19	1,06	0,71	1,38	16,38	55,26
MUESTRA	DÍA	HUMEDAD [%]	pH [adimensional]	GRADOS BRIX [%]	POL [%]	PUREZ A [%]	AC LACT KIT [ppm]	AC LACT HPLC [ppm]
JUGO FILTRADO ROTATIVO	1		6,75	12,09	10,02	82,88	670,61	-

Continuación de la tabla XXVII.

	2		7,59	11,59	9,73	83,94	966,57	953,61
	3		8,95	10,57	8,87	83,63	694,91	1 042,10
	4		7,9	9,96	8,4	84,42	292,81	255,89
	5		7,03	10,7	9,07	84,64	756,53	577,82
	6		7,01	10,57	9,07	85,83	555,72	613,11
	7		7,65	10,95	9,41	86,01	472,77	513,87
	8		6,74	9,1	7,92	87,03	494,88	443,49
	PROMEDIO		7,45	10,69	9,06	84,8	613,1	628,57
	DESVIACIÓN ESTANDAR		0,74	0,92	0,68	1,39	205,31	278,64
JUGO FILTRADO BANDA	1		9,37	10,59	8,48	80,08	141,13	-
	2		7,93	12,55	10,18	81,14	114,11	144,82
	3		10,71	12,31	9,87	80,22	184,93	236,81
	4		9,775	8,92	7,55	84,68	55,64	98,93
	5		8,16	13,13	11,11	84,59	87	95
	6		8,85	10,7	9,27	86,59	98,42	116,27
	7		9	11,15	9,56	85,75	64,91	130,27
	8		8,11	7,4	6,46	87,13	51,95	68,99
	PROMEDIO		8,99	10,84	9,06	83,77	99,76	127,3
DESVIACIÓN ESTANDAR			0,95	1,93	1,5	2,87	45,95	54,28
CACHAZA FILTRO ROTATIVO	1	71,02	8,32	10,56	7,76	73,48	477,85	
	2	70,34	9,63	8,02	6,3	78,58	524,11	
	3	72,9	9,68	8,47	6,53	77,2	453,33	
	4	73,22	8,71	7,52	5,46	72,75	178,5	
	5	73,59	8,72	7,1	5,5	77,69	402,99	
	6	72,08	8,36	7,07	5,41	76,94	294,16	
	7	70,7	9,25	8,2	6,49	79,2	279,32	
	8	76,48	7,86	5,4	4,23	77,92	240,44	
	PROMEDIO	72,54	8,82	7,79	5,96	76,72	356,34	
DESVIACIÓN ESTANDAR	2	0,65	1,47	1,05	2,35	124,99		
CACHAZA FILTRO BANDA	1	67,61	8,89	10,72	8,64	80,6	111,9	
	2	62,52	7,9	8,84	7,23	81,82	57,37	
	3	63,52	10,77	10,92	8,07	74,16	122,11	
	4	65,41	9,62	6,96	5,68	81,63	31,42	
	5	64,24	8,14	9,07	7,53	83,07	44,03	
	6	64,46	9,02	9,87	7,94	80,48	67,46	
	7	63,02	9,39	9,8	7,47	76,18	41,54	
	8	68,07	8,32	6,2	4,78	76,94	32,33	
	PROMEDIO	64,85	9,01	9,05	7,17	79,36	61,51	
DESVIACIÓN ESTANDAR	2,05	0,93	1,69	1,29	3,18	35,24		

Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio A, 2015.

Tabla XXVIII. Tabulación y ordenamiento de datos del Ingenio B

MUESTRA	DÍA	HUMEDAD [%]	pH [adimensional]	GRADOS BRUX [%]	POL [%]	PUREZA [%]	AC LACT KIT [ppm]
JUGO CLARO	1		6,64	13,85	11,82	85,28	101,5
	2		6,8	13,2	11,24	85,15	98
	3		6,72	14,2	12,22	86,02	141
	4		7,43	15	13,16	87,71	112,5
	5		6,85	13,55	11,82	87,23	85
	6		6,78	13,41	11,59	86,38	82,5
	7		6,56	14,12	12,07	85,49	83
	PROMEDIÓ		6,83	13,9	11,99	86,18	100,5
DESVIACIÓN ESTANDAR		0,28	0,61	0,61	0,99	21,06	
LODO CALIENTE	1		7,155	12,4	10,17	81,94	75
	2		10,66	10,13	8,36	82,46	83,45
	3		7,34	11,98	10,13	84,51	101,4
	4		7,36	15,6	13,48	86,44	113,4
	5		7,19	12,9	10,91	84,57	32,58
	6		7,04	12,1	10,06	83,15	53,1
	7		7,08	12,07	10,07	83,46	63,6
	PROMEDIO		7,69	12,45	10,45	83,79	74,65
	DESVIACIÓN ESTANDAR		1,32	1,63	1,54	1,56	27,84
JUGO FILTRADO ROTATIVO	1		6,14	11,6	9,31	80,26	542,5
	2		6,28	8,67	6,9	79,61	598,33
	3		7,28	7,98	6,48	81,3	1 880,00
	4		6,61	14	11,64	83,25	572,5
	5		6,34	9,93	8,24	83,03	465
	6		6,26	9,85	7,85	79,72	571,25
	7		6,2	11,93	9,79	81,87	671,67
	PROMEDIO		6,44	10,56	8,6	81,29	757,32
	DESVIACIÓN ESTANDAR		0,4	2,08	1,79	1,5	498,9
JUGO FILTRADO BANDA	1		11,04	6,3	5,16	81,39	217,92
	2		11,45	5,23	4,25	81,24	187,68
	3		8,69	7,62	6,25	81,77	386,54
	4		11,29	9	7,45	82,58	297,95
	5		11,04	5,15	4,26	82,61	56,45
	6		9,47	4,88	4,07	83,47	63,36
	7		11,18	3,13	2,54	81,13	49,06
	PROMEDIO		10,59	5,9	4,85	82,03	179,85
	DESVIACIÓN ESTANDAR		1,07	1,93	1,61	0,88	131,71
CACHAZA FILTRO ROTATIVO	1	71,75	7,14	8,4	5,68	67,62	
	2	74,69	7,57	6,67	4,36	65,63	
	3	72,72	6,63	5,7	3,95	69,28	
	4	72,23	7,53	9	7,1	79,56	
	5	73,22	7,71	5,6	3,99	71,25	
	6	74,75	7,38	6,55	4,71	72,19	
	7	71,53	7,34	9,53	6,5	66,65	
	PROMEDIO	72,98	7,33	7,35	5,18	70,31	

Continuación de la tabla XXVIII.

	DESVIACIÓN ESTANDAR	1,31	0,36	1,61	1,26	4,72	
MUESTRA	DIA	HUMEDAD [%]	pH [adimensional]	GRADOS BRUX [%]	POL [%]	PUREZA [%]	AC LACT KIT [ppm]
CACHAZA FILTRO BANDA	1	74,67	11,32	1,80	1,19	65,13	
	2	76,08	11,83	1,73	1,02	59,51	
	3	76,16	9,79	2,20	1,48	67,83	
	4	72,90	11,62	3,00	2,21	73,38	
	5	73,29	10,91	2,20	1,61	72,96	
	6	73,81	10,73	3,10	2,09	68,83	
	7	75,41	10,31	1,60	1,13	69,42	
	PROMEDIO	74,62	10,93	2,23	1,53	68,15	
DESVIACIÓN ESTANDAR	1,33	0,73	0,60	0,47	4,77		

Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio B, 2015.

Tabla XXIX. **Tabulación y ordenamiento de datos del Ingenio C**

MUESTRA	DIA	HUMEDAD [%]	pH [adimensional]	GRADOS BRUX [%]	POL [%]	PUREZA [%]	AC LACT KIT [ppm]	AC LACT KIT [ppm]
JUGO CLARO	1		6,68	13,05	11,18	85,68	189	-
	2		6,79	12,8	10,89	85,11	101,75	110,3
	3		7,12	13,24	11,51	86,91	59,4	76,84
	4		6,97	11,6	9,81	84,58	82,4	76,4
	PROMEDIO		6,89	12,67	10,85	85,57	108,14	87,84
	DESVIACIÓN ESTANDAR		0,19	0,74	0,73	1	56,62	19,44
LODO CALIENTE	1		6,8	10,85	8,96	82,86	151,2	-
	2		7,14	11	9,17	83,36	96,9	128,42
	3		7,14	11,02	9,41	85,4	96,98	76,37
	4		7,2	10,76	8,9	82,75	92,88	93,42
	PROMEDIO		7,07	10,91	9,11	83,59	109,49	99,4
	DESVIACIÓN ESTANDAR		0,18	0,12	0,23	1,23	27,87	26,54
JUGO FILTRADO MEZCLADO	1		6,64	8,07	6,8	81,36	310,81	-
	2		7,71	7,73	6,28	81,53	133,5	270,27
	3		9,48	7,14	5,83	81,73	199,77	218,3
	4		9,98	6,5	4,42	80,21	251,22	291,39
	PROMEDIO		8,45	7,36	5,83	81,21	223,83	259,99
	DESVIACIÓN ESTANDAR		1,55	0,69	1,02	0,68	75,39	37,61
CACHAZA BANDA 1	1	69,56	7,33	3,4	2,12	61,74	95,58	
	2	69,43	8,32	2,6	1,76	66,44	32,37	
	3	70,04	9,84	2,64	1,77	66,92	53,69	

Continuación de la tabla XXIX.

MUESTRA	DIA	HUMEDAD [%]	pH [adimensional]	GRADOS BRIX [%]	POL [%]	PUREZA [%]	AC LACT KIT [ppm]	AC LACT KIT [ppm]								
									CACHAZA BANDA 2	1	69,40	7,4	3,00	1,79	59,08	83,68
										2	69,99	8,335	2,00	1,36	67,90	24,88
3	68,39	9,84	2,32	1,39	59,95	45,90										
CACHAZA BANDA 3	4	71,04	9,29	2,00	0,92	45,52	56,46									
	PROMEDIO	69,70	8,72	2,33	1,37	58,11	52,73									
	DESVIACIÓN ESTANDAR	1,11	1,07	0,47	0,36	9,28	24,45									
CACHAZA BANDA 2	1	68,74	10,26	2,00	1,23	62,12	54,68									
	PROMEDIO	69,44	8,94	2,66	1,72	64,30	59,08									
	DESVIACIÓN ESTANDAR	0,54	1,36	0,57	0,36	2,76	26,42									
CACHAZA BANDA 3	1	69,43	7,34	4,20	2,54	59,76	119,14									
	2	67,41	8,29	3,10	2,10	66,89	37,78									
	3	68,21	9,786	3,04	1,93	64,35	60,61									
CACHAZA BANDA 3	4	65,75	10,28	2,12	1,21	59,44	55,61									
	PROMEDIO	67,70	8,92	3,12	1,94	62,61	68,28									
	DESVIACIÓN ESTANDAR	1,54	1,35	0,85	0,55	3,63	35,29									

Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio C, 2015.

3.8. Análisis estadístico

El método estadístico utilizado para el estudio de los datos concentración de ácido láctico de jugos filtrados fue el análisis de varianza con arreglo bifactorial combinatorio en el programa Excel. Este servirá para aceptar o rechazar la hipótesis propuesta con anterioridad al demostrar si hay o no existencia de diferencia significativa entre el contenido de ácido láctico de los jugos filtrado de ambas tecnologías de filtración de cachaza; por lo tanto se realizará el análisis estadístico únicamente sobre los datos recolectados de los ingenios A y B.

A continuación se detalla el análisis estadístico, con un nivel de confiabilidad del 95 %, de los datos obtenidos en la parte experimental del estudio.

Tabla XXX. **Análisis de varianza con arreglo bifactorial combinatorio**

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Ingenios	133 432,40	1,00	133 432,40	1,82	0,18	3,98
Tecnologías	5 162 570,73	1,00	5 162 570,70	70,26	0,00	3,98
Interacción	5 655,46	1,00	5 655,46	0,08	0,78	3,98
Dentro del grupo	4 996 602,27	68,00	73 479,45			
Total	10 298 260,86	71,00				

Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenios A, B y C, 2015.

A partir del análisis de varianza con arreglo bifactorial combinatorio se puede determinar que:

- Existe diferencia significativa respecto a la concentración de ácido láctico en los jugos filtrados procedentes de ambas tecnologías de filtración de cachaza, rotativa y banda. Por lo tanto, se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alternativa del estudio.
- No existe diferencia significativa respecto a la concentración de ácido láctico entre Ingenios A y B.
- No existe diferencia significativa en como los Ingenios A y B operan las tecnologías de filtración de cachaza.

El método estadístico utilizado para la comparación de las tres metodologías analíticas de ácido láctico fue la prueba t pareada con InfoStat. El 50 % de las muestras de jugos de los ingenios se analizaron con el equipo de cromatografía líquida de alta eficiencia HPLC.

Estos análisis permitieron comparar las dos tecnologías utilizadas en los laboratorios de los ingenios (espectroscopia UV y reflectómetro) con respecto al HPLC mediante la prueba de t pareada.

Tabla XXXI. **Prueba t pareada ($\alpha=0,05$) para evaluación de las tecnologías de análisis de ácido láctico**

Prueba T (muestras apareadas)

Obs (1)	Obs (2)	N	media (dif)	Media (1)	Media (2)	DE (dif)	T	Bilateral
ACID LACT ROCHE	ACID LACT HPLC	32	-34.32	216.40	250.71	77.54	-2.50	0.0178
Obs (1)	Obs (2)	N	media (dif)	Media (1)	Media (2)	DE (dif)	T	Bilateral
ACID LACT MERCK	ACID LACT HPLC	24	-34.00	120.22	154.23	119.86	-1.39	0.1779

Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenios A y C, 2015.

Según la prueba t pareada existe diferencia estadística significativa entre los valores obtenidos con el método de Espectroscopia UV-Roche y HPLC, mientras que el método Reflectométrico no mostró diferencia significativa respecto al HPLC.

4. RESULTADOS

4.1. Carga microbiológica en filtros de cachaza

Los análisis microbiológicos fueron realizados por Osbel Nuñez y su equipo durante la zafra 2014-2015, en el área de filtración de los Ingenios A y B, evaluando ambas tecnologías de filtración de cachaza.

Tabla XXXII. **Recuento de mesófilos y termófilos (UFC/g) en el área de Filtración de Cachaza para dos ingenios**

Puntos de muestreo	Ingenio A		Ingenio B	
	Mesófilos	Termófilos	Mesófilos	Termófilos
Lodo virgen	Menos de 10	40	Menos de 10	15
Bandeja filtro rotativo	410	Más de 3 000	370	2 400
Rebalse filtro rotativo	670	Más de 3 000	360	2 800
Jugo filtrado de f. rotatorios	15	50	20	15
Superficie filtro prensa	10	15	Menos de 10	10
Jugo filtrado de f. prensa	Menos de 10	Menos de 10	10	12

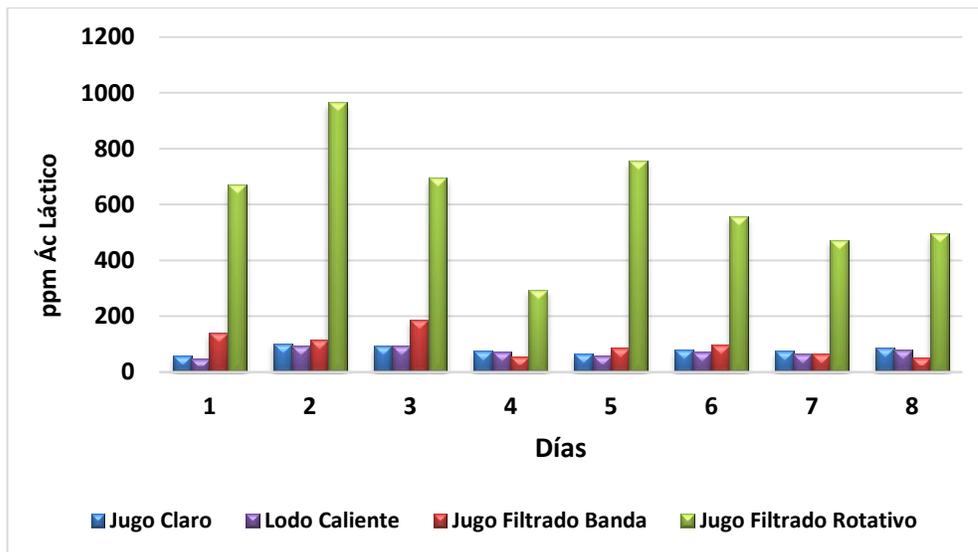
- Valores muy altos, por encima del límite superior de la prueba.
- Valores relativamente altos.
- Valores muy bajos, por debajo del límite inferior de la prueba.

Fuente: reporte de resultados, Optimisa.

4.2. Contenido de ácido láctico en las corrientes del área de filtración

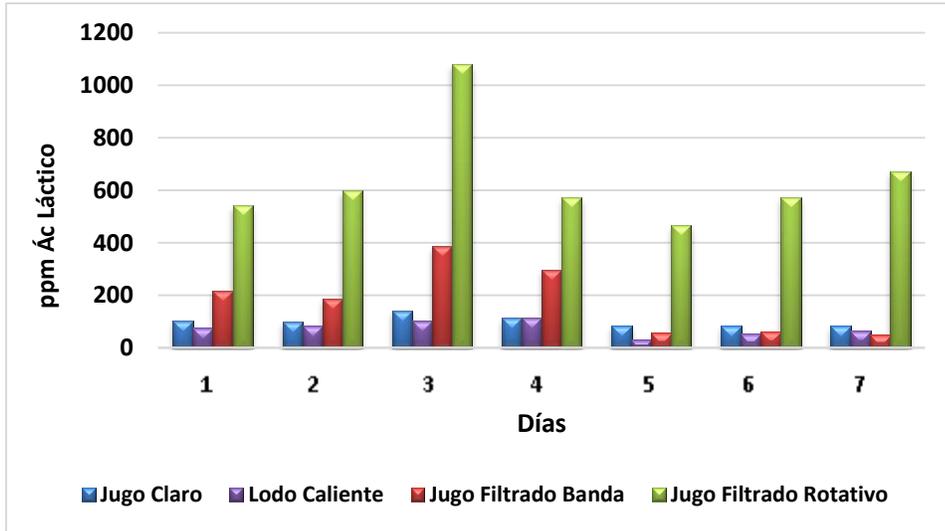
El promedio diario del contenido de ácido láctico (en ppm) de las corrientes analizadas en los tres ingenios se muestran en las siguientes figuras:

Figura 19. **Contenido promedio de ácido láctico (en ppm) por corrientes, Ingenio A, método de espectroscopia ultravioleta-visible (UV) - Roche**



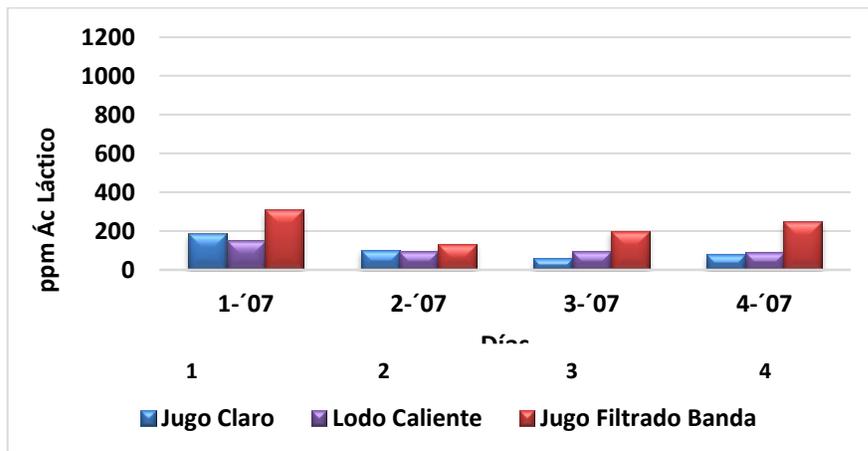
Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio A, 2015.

Figura 20. Contenido promedio de ácido láctico (en ppm) por corrientes, Ingenio B, método reflectométrico - RQflex10



Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio B, 2015.

Figura 21. Contenido promedio de ácido láctico (en ppm) por corrientes, ingenio C, método reflectométrico - RQflex10



Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio C, 2015.

Tabla XXXIII. **Estimación de pérdidas de sacarosa diarias por fermentación láctica en área de filtración de cachaza para tres ingenios**

Ingenio	Porcentaje de alimentación		kg Ac Lac formados/día FILTRO BANDA	kg Ac Lac formados/día FILTRO ROTATIVO	kg Ac Lac total generados/día en filtros	kg sac fermentada en filtros/día	kg sac/TC perdidos
	Porcentaje Lodo Banda	Porcentaje Lodo Rotativo					
A	49,94	50,06	44,07	1,017,12	1,061,20	2,122,39	0,08
B	81,88	18,12	124,09	130,38	254,47	508,94	0,06
C	100,00	-	418,51	-	418,51	837,02	0,05

Fuente: elaboración propia, Cengicaña.

Tabla XXXIV. **Estimación de recuperación de sacarosa por cambio de filtro rotativo a filtro banda**

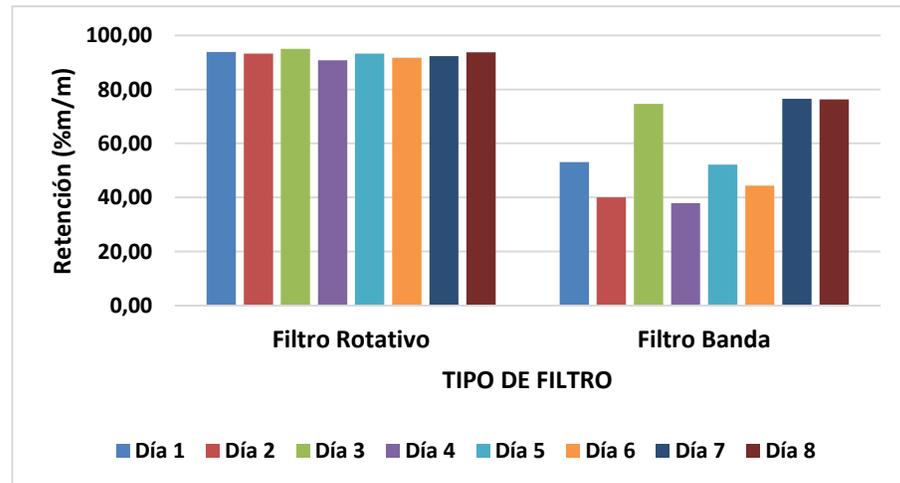
Ingenio	kg sac fermentada/día (caso 100 % BANDA)	kg sac fermentada/día (caso 100 % ROTATIVO)	kg sac a recuperar en jugos/día (cambio de tecnología)	kg sac/TC (recuperables por cambio de tecnología)	qq de azúcar a recuperar/ zafra
A	151,01	2,157,72	907,81	0,03	3,643,13
B	151,05	725,09	149,87	0,02	601,45
C	418,51	-	-	-	-

Fuente: elaboración propia, Cengicaña.

4.3. Retención de lodos en filtros de cachaza

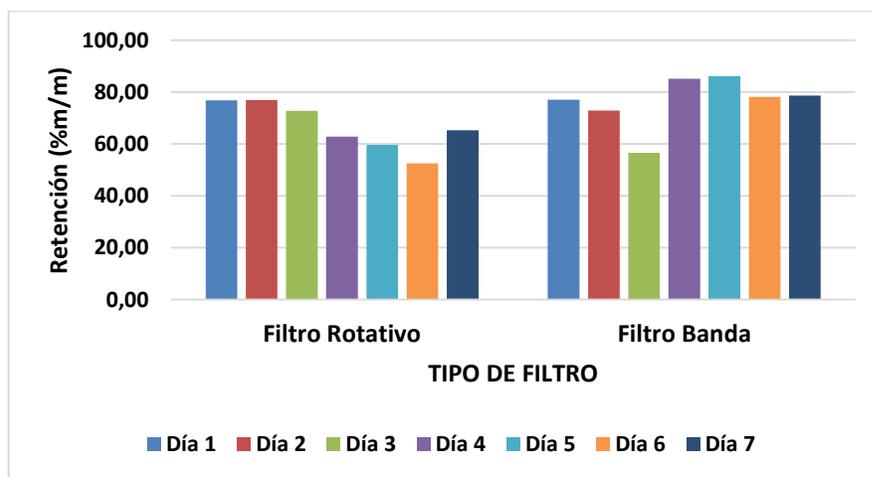
La ecuación 11.7 para retención expuesta por Peter Rein permite obtener un estimado de retención de lodos (porcentaje metro por metro) a partir del centrifugado de una muestra de lodo y jugo filtrado. Dicha ecuación fue aplicada para el análisis de la retención en los tres ingenios.

Figura 22. **Retención promedio (por día) para ambas tecnologías de filtración de cachaza, Ingenio A**



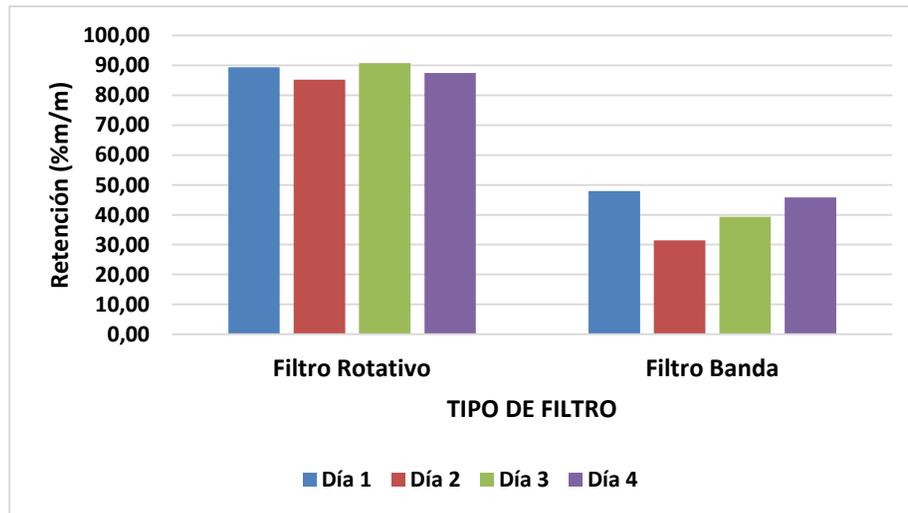
Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio A, 2015.

Figura 23. **Retención promedio (por día) para ambas tecnologías de filtración de cachaza, Ingenio B**



Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio B, 2015.

Figura 24. **Retención promedio (por día) para la tecnología de filtración de cachaza banda, Ingenio C**

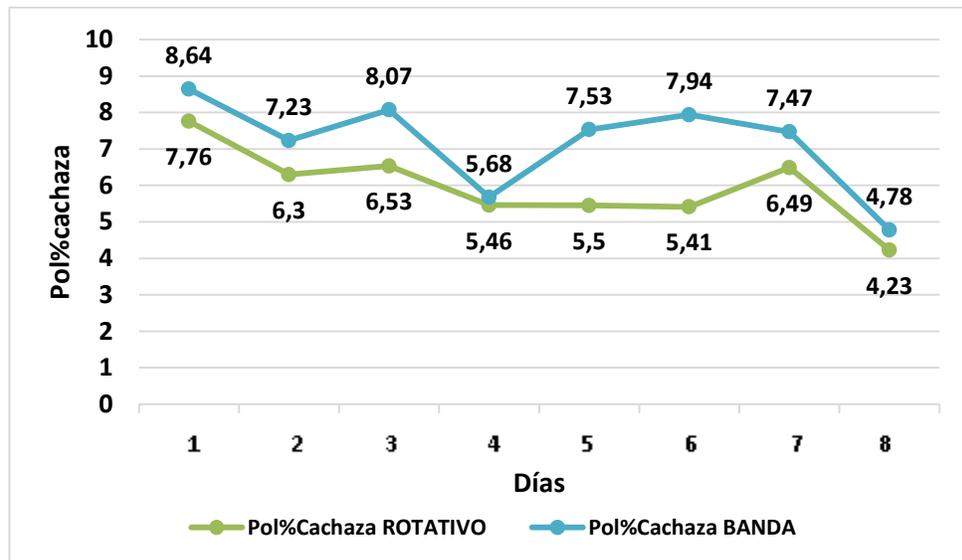


Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio C, 2015.

4.4. **Análisis de agotamiento de cachaza**

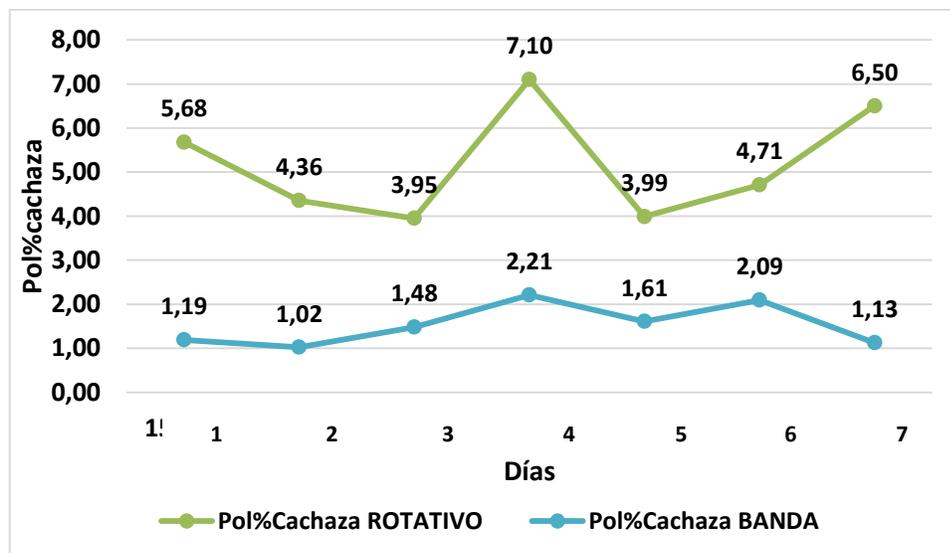
El área de Filtración de Cachaza tiene como objetivo la extracción de la mayor cantidad de jugo dentro del lodo, asegurando que el contenido de sacarosa en cachaza, Pol % cachaza, sea el más bajo posible. Por lo tanto, se evaluó que tecnología de filtración permite un mayor agotamiento de cachaza y a su vez menores pérdidas en el área.

Figura 25. **Análisis de Pol de cachaza (promedio diario), Ingenio A**



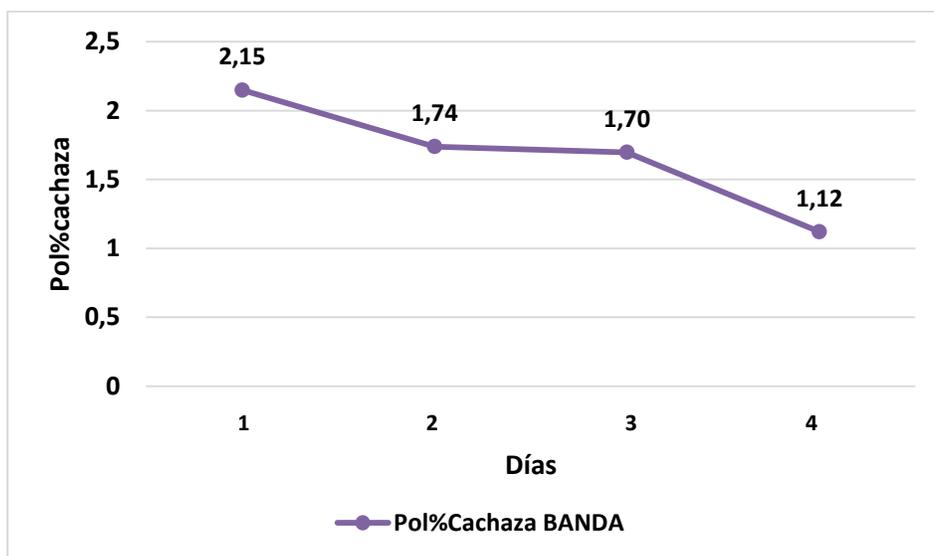
Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio A, 2015.

Figura 26. **Análisis de Pol de cachaza (promedio diario), Ingenio B**



Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio B, 2015.

Figura 27. **Análisis de Pol de cachaza (promedio diario), Ingenio C**



Fuente: datos experimentales. Laboratorio de Control de Calidad, Ingenio C, 2015.

Tabla XXXV. **Estimación de pérdidas de sacarosa en cachaza para tres Ingenios**

Ingenio	Filtros Rotativo		Filtros Banda		Promedio			
	Pol Rotativos (100 %)	Pérdida Cachaza (kg/TC)	Pol Banda (100 %)	Pérdida Cachaza (kg/TC)	Pol % Cachaza	Pérdida Cachaza (kg/TC)	TM Azúcar pérdidas/ zafra	Aumento de recuperación total/zafra
A	5,96	2,62	7,17	3,15	6,46	2,84	13 533,42	1,82
B	5,18	1,55	1,53	0,46	2,63	0,79	1 341,63	0,13
C	-	-	1,68	0,41	1,68	0,41	1 249,50	-

Fuente: elaboración propia, Cengicaña.

5. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

El presente estudio de investigación tuvo como objetivo cuantificar las pérdidas de sacarosa en el área de Filtración de Cachaza, en función del análisis de ácido láctico y parámetros fisicoquímicos de las corrientes. La investigación consistió en tomar muestras de jugo clarificado, lodo caliente, jugo filtrado y cachaza de filtros rotativos y banda en los ingenios A, B y C; se le agregó inmediatamente bactericida a los flujos líquidos, para evitar la fermentación de azúcares.

Los análisis realizados fueron: conteo de mesófilos y termófilos, grados Brix, Pol, pureza, pH, humedad y ácido láctico, en conjunto con las retenciones de lodos en los filtros de banda y rotativos. Evaluando las condiciones en conjunto a los flujos de las corrientes que cada uno de los Ingenios proporcionó, se pudo cuantificar las pérdidas promedio de sacarosa generadas por actividad microbiológica, recirculación de lodos y agotamiento de cachaza.

En la tabla XXXII se muestran los resultados de los análisis microbiológicos realizados por Osbel Nuñez y su equipo de Optimisa, durante la zafra 2014-2015, en los Ingenios A y B. Los análisis consistieron en conteos microbiológicos de mesófilos y termófilos, ambos grupos representantes de bacterias lácticas, dando como resultado mayor actividad en el filtro rotativo con respecto al filtro banda, especialmente en las bandejas y rebalse del filtro rotativo. Esto se atribuye a que en los filtros rotativos se dan condiciones adecuadas para el desarrollo microbiano como: puntos con poco movimiento, la bandeja de alimentación y disminución de temperatura en dichos puntos, lo que no ocurre en los filtros banda.

Reconociendo la alta actividad microbiológica en el área de Filtración, se procedió a cuantificar el contenido de ácido láctico en las corrientes del área. El promedio del contenido de ácido láctico por día (en ppm) de las corrientes analizadas en los tres ingenios se muestran en las figuras 19, 20 y 21, donde se observa que el contenido de ácido láctico en las corrientes de jugo claro y lodo son las más bajas, en la corriente de jugo filtrado banda el contenido aumenta aproximadamente el doble con respecto a su alimentación (lodo), mientras que en la corriente de jugo filtrado rotativo este aumento es de aproximadamente 10 veces con respecto al mismo lodo alimentado, manifestando que este último es el que genera mayores pérdidas de sacarosa por fermentación.

Es importante notar que el contenido de ácido láctico en el Ingenio C, para lodo y jugo filtrado, es mayor que el encontrado en los otros ingenios para las mismas corrientes, este fenómeno se cree que puede ser causado por una recirculación de jugo filtrado que realiza el ingenio para diluir el lodo y evitar el uso de agua, información que fue comentada por el jefe de área de Tratamiento del Ingenio C.

El 50 % de las muestras de jugos de los Ingenios A y C se analizaron nuevamente en el laboratorio de Cengicaña con el equipo de cromatografía líquida de alta eficiencia HPLC, el cual permite la lectura de muestras con resultados cuantitativos precisos. Estos análisis permitieron comparar las dos tecnologías utilizadas en los laboratorios de los ingenios (espectroscopia UV y reflectómetro) con respecto al HPLC (que se designó como el valor real). Mediante la prueba de t pareada, los datos se muestran en la tabla XXXI, se determinó que existe diferencia estadística significativa entre los valores obtenidos con el método de Espectroscopia UV-Roche y HPLC, mientras que el método Reflectométrico no mostró diferencia significativa respecto al HPLC.

Con base en el análisis estadístico, se puede establecer que el método más efectivo para el análisis de ácido láctico, entre las dos metodologías aplicables en los laboratorios de los ingenios, es el Reflectométrico (RQflex10-MERCK). Es importante considerar que dicha metodología es más simple, portátil y rápida que el método de Espectroscopia UV-Roche.

Algunas referencias bibliográficas sugieren que la relación de sacarosa destruida respecto a ácido láctico formado es de aproximadamente 2:1, existiendo valores que fluctúan desde 0,8 hasta 4,4 para condiciones de temperatura de aproximadamente 60-65°C, según Ravno; considerándose esta, una temperatura similar a la existente en las estaciones de filtrado. Con la relación 2:1, los análisis de ácido láctico y los flujos de las corrientes se determinó la pérdida de sacarosa por acción microbiológica en la estación de filtros de cachaza.

En la tabla XXXIII se observa que en el Ingenio A, donde el porcentaje de alimentación de lodos que manejaban ambos filtros dio valores similares por balance de ecuaciones (50 % c/uno), los kilogramos de ácido láctico formados por día en el filtro rotativo son mayores a los formados por los filtros banda, mientras que en el ingenio B, donde el filtro banda maneja el mayor porcentaje de alimentación de lodos (80 %), el contenido de ácido láctico aumenta, pero aún se mantiene bajo respecto al rotativo. El cálculo permitió determinar que la cantidad de sacarosa fermentada por día en la estación de filtros de cachaza es mayor cuando el filtro rotativo tiene mayor participación en relación al manejo de lodos.

Sabiendo el contenido de ácido láctico formado por día, para ambas tecnologías de filtración, se pudo estimar cuanta sacarosa fermentaría si cada ingenio trabajará con el filtro banda, y a su vez evaluar cuánta recuperación tendrían, tales datos se muestran en la tabla XXXIV.

Los datos determinaron que la pérdida de sacarosa por acción microbiológica no representa un valor significativo (valor máximo calculado de 0,08 kg/TC respecto a las pérdidas totales de 22,7 kg/TC para el Ingenio A). Referencias bibliográficas sugieren controlar la pérdida microbiológica por medio de temperaturas de lodos, jugos y agua de lavado arriba de 80 °C, evitar el estancamiento o recirculación de lodos, dosificar bactericida. Un menor contenido de ácido láctico en el jugo filtrado evita disminución del pH y la formación de sales con características de cenizas (lactato de calcio) que pueden provocar incrustaciones o dificultar la cristalización.

Según Zapeta, la filtración de la cachaza tiene dos funciones principales: la primera es la recuperación de la máxima cantidad de jugo filtrado arrastrado con los lodos del clarificador, para asegurar que el contenido de sacarosa en cachaza sea el más bajo posible; la segunda es la remoción del mayor porcentaje de sólidos insolubles hacia la cachaza, de forma que su presencia en el jugo filtrado sea mínima.

Las figuras 22, 23 y 24 muestran las retenciones encontradas en los tres ingenios para las dos tecnologías de filtración de cachaza. Se observa que ambas tecnologías de filtración pueden alcanzar retenciones altas (arriba del 85 %), como indica Birkett, pero de igual forma pueden llegar a tener bajas retenciones si no se manejan condiciones adecuadas, como se observa en los Ingenios A y B para los filtros rotativos y banda, respectivamente.

La última parte de la investigación consistió en evaluar que tecnología de filtración permite un mayor agotamiento de cachaza y a su vez menores pérdidas en el área. Las figuras 25, 26 y 27 muestran las lecturas promedio (por día) de Pol % cachaza para ambas tecnologías de filtración en los tres ingenios analizados.

El ingenio A muestra valores de Pol % cachaza altos (se establecen como valores altos, arriba de 2,5) para ambos tipos de filtros, mientras que el ingenio B muestra valores altos para el filtro rotativo y valores bajos (menores a 2,5) para el filtro banda. Respecto al ingenio que maneja exclusivamente filtros banda se observó que su Pol % cachaza es bajo, en promedio menor a 2.

Se estableció que los filtros banda permiten obtener valores más bajos de Pol % cachaza que los rotativos, alcanzando un valor promedio de hasta 1,53, siempre y cuando se operen adecuadamente. Los filtros rotativos mostraron valores de Pol % cachaza altos, dando el promedio más bajo 5,18. Harold Birkett muestra en un estudio realizado en ingenios de Louisiana un promedio de 4,08 de Pol % cachaza para filtros rotativos y 2,36 en los filtros banda.

Con datos obtenidos durante la zafra respecto a las toneladas de caña molida reportadas totales y el promedio de Pol % cachaza determinada se realizó la tabla XXXV. Dicha tabla presenta una estimación de la pérdida de sacarosa por agotamiento de cachaza que se genera en cada ingenio, en este se puede observar el Pol % cachaza por tecnología de filtración y su promedio ponderado (respecto al porcentaje de lodo que maneja cada filtro).

En la última columna se muestra la oportunidad de mejora para los ingenios, la cual se representa como un aumento en la recuperación total del ingenio respecto al menor dato encontrado para el filtro banda (1,53 % de Pol

en cachaza), esto se puede alcanzar si los ingenios analizados optarán por utilizar únicamente filtros banda y se asegurarán de operarlos adecuadamente según la cantidad de lodos que manejan. No se analizó la facilidad de agotamiento con respecto a las características físicas de los sólidos insolubles.

CONCLUSIONES

1. Existe mayor contenido de ácido láctico, en ppm, en el jugo filtrado de filtro rotativo que en el jugo filtrado de filtro banda.
2. Las tres metodologías analíticas son de utilidad para la determinación de ácido láctico, pero estadísticamente la metodología analítica Reflectoquant de Merck resulto más precisa respecto a la tecnología HPLC, además de ser de menor costo y portátil.
3. Ambas tecnologías de filtración de cachaza permiten obtener retenciones superiores a 85 %, dependiendo de las condiciones que se le establezcan a los filtros.
4. Los jugos filtrados de filtros rotativos mostraron un mayor valor de unidades UFC/g con respecto a los jugos filtrados de filtro banda en los Ingenios A y B.
5. Con un manejo adecuado los filtros banda pueden generar menores pérdidas de Pol, ya sea por causas microbiológicas o por agotamiento de cachaza.

RECOMENDACIONES

1. Implementar el análisis de ácido láctico y retención en los laboratorios para monitorear la calidad de los jugos filtrados.
2. Controlar las condiciones del proceso de filtración de cachaza, especialmente la temperatura del agua de lavado y flujos del área, manteniéndolos arriba de los 80 °C, para minimizar la actividad microbiológica.
3. Evaluar en cada ingenio el efecto que tiene la adición de agua al proceso de filtración de cachaza con respecto al uso de vapor en la evaporación.
4. Se debe revisar el muestreo de cachaza en los ingenios y preferiblemente se deben tomar las muestras en el conductor de cachaza hacia la disposición final.
5. Evaluar las condiciones óptimas de operación de los filtros con base en la cantidad de lodos que maneja el ingenio.
6. Realizar pruebas de permeabilidad según tipos de floculantes y pH de lodos.

BIBLIOGRAFÍA

1. AYALA GONZÁLES, Amílcar Eduardo. *Calificación del desempeño de un filtro banda para maximizar la recuperación de sacarosa en la cachaza proveniente de la clarificación del jugo de caña*. Trabajo de graduación de Ingeniero Químico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2012. 75 p.
2. BIRKETT, Harold. *Filter station operation*. Louisiana: The American Sugar Cane League and All Louisiana Raw Sugar Factories, 2014. 17 p.
3. CALERO, L., et. al. *Factores que inciden en las pérdidas indeterminadas del proceso de elaboración de azúcar*. Cali, Colombia: 2009. 672 p.
4. CHEN, James. *Manual del azúcar de caña*. 11a ed. México D.F.: Limusa, 1991. 1013 p.
5. Córdoba Industrial Ltda. *Filtro Vacuum Press. Ribeirão Preto, Brasil*: 2014. 17 p.
6. CUTZ SAQUIMUX, Luis Leonardo. *Determinación de la pérdida de azúcar por exceso de lavado en una centrifuga semiautomática 1,22 m x 0,76 m Ingenio Trinidad*. Escuintla, Guatemala. Trabajo de graduación de Ing. Químico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2004. 52 p.

7. ESQUITE LAINFIESTA, Bryan Ronaldo. *Cuantificación de pérdidas de azúcar en los efluentes del proceso industrial de un ingenio azucarero*. Trabajo de graduación de Ing. Químico. Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería, 2011. 113 p.
8. FOSTER, D. H. *Rotary Filter Operation*. México: McGrill-Hill, 1954. 216 p.
9. GOVENDER, K.; WILLIAMSON A. *An investigation into undetermined loss at Komati mill*. Estados Unidos: Artemis, 1969. 178 p.
10. HONIG, Pieter. *Principios de tecnología azucarera*. Tomo 1, México: Continental, 1969. 449 p.
11. Huletts Sugar Limited. *Research and Development*. Sugar Technology. South Africa: 1975. 223 p.
12. LIONNET, G.R.E. *Mud filtration. Proc S Afr Sug Technol Ass*, 70: México: McGrill-Hill, 1969. 300 p.
13. MADAREE S.J. *Lactic acid formation across a filter station*. The South African Sugar Technologists' Association. 135-138. June 1991.
14. MCMASTER Y RAVNO. *Sucrose loss in diffusion with reference to thermophilic bacteria and lactic acid*. México: McGrill-Hill, 1975. 290 p.
15. MELGAR, Mario, et. al. *El cultivo de la caña de azúcar en Guatemala*. Guatemala: Artemis Edinter, 2012. 512 p.

16. NUÑEZ, Osbel. *Reporte de resultados. Guatemala: Cengicaña y Optimisa, 2015. 2 p.*
17. RAIMBAULT, Maurice. *Impacto de la microbiología en la fabricación del azúcar. Colombia: Asocaña – Orstom, 1994. 194 p.*
18. RAMOS, Alexander. *Pérdidas indeterminadas en el proceso de elaboración del azúcar de caña. Tecnicaña (Capacitación técnica para la Agroindustria Azucarera). Volumen 6, Revista No. 12. Colombia: 2002. 12 p.*
19. RAVNO, L. M. *Sucrose loss in difussion with reference to thermophilic bacteria and acid lactic. Proceedings of The South African Sugar Technologists' Association. México: McGrill-Hill, 1975. 140 p.*
20. REIN, Peter. *Ingeniería de la caña de azúcar. Alemania: Bartens, 2012. 880 p.*

APÉNDICES

Apéndice 1. Tecnologías de filtración de cachaza



Fuente: fotografía tomada en Ingenios A, zafra 2014-2015.

Apéndice 2. Toma de las muestras



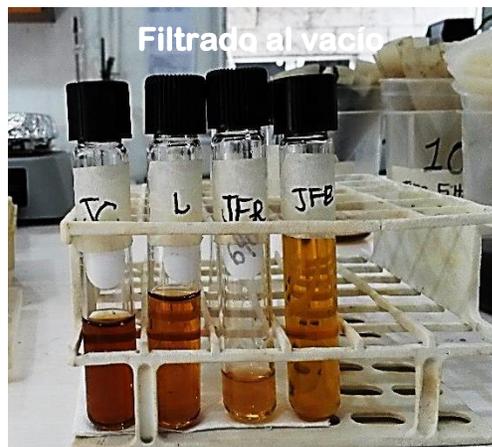
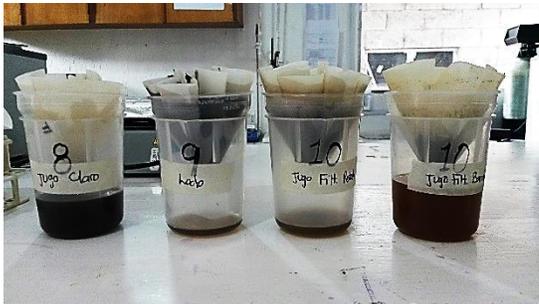
Fuente: fotografía tomada en Ingenios A, zafra 2014-2015.

Apéndice 3. Preparación de las muestras



Continuacion del apéndice 3.

- JUGOS



- CACHAZA



Fuente: fotografía tomada en Ingenios A, zafra 2014-2015.

Apéndice 4. **Lectura de las muestras**

- **JUGOS**



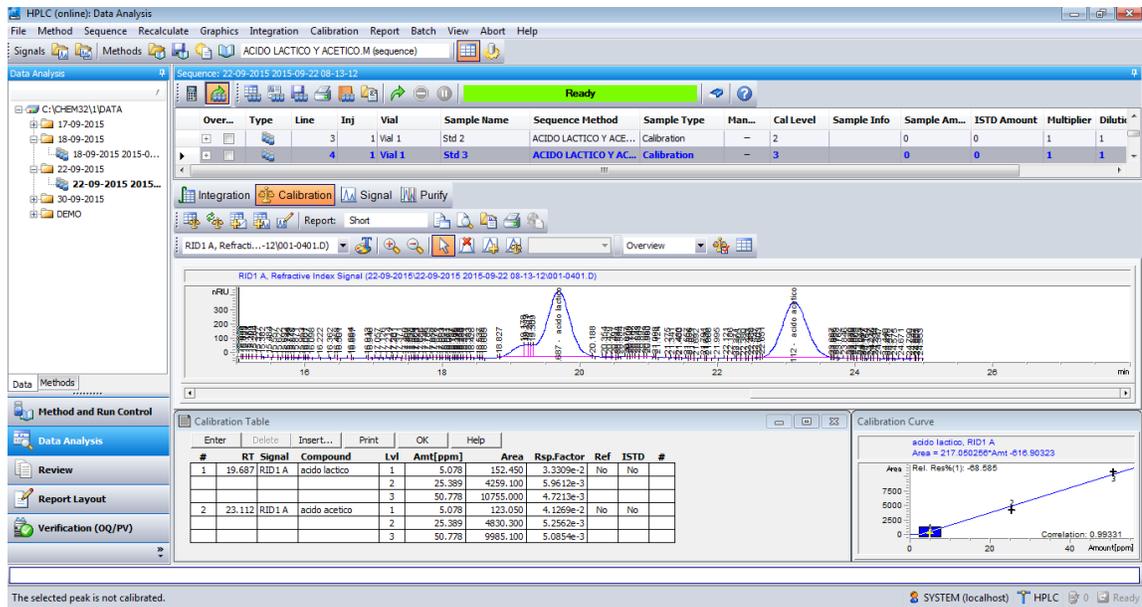
- **pH**



- **ÁCIDO LACTICO**

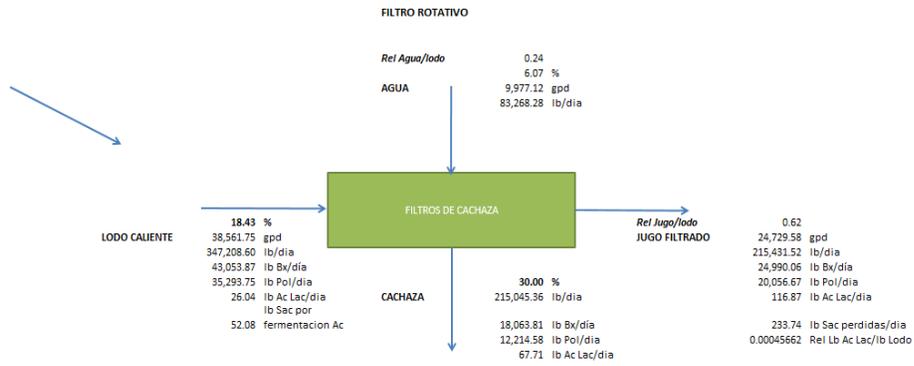


Continuacion del apéndice 4.

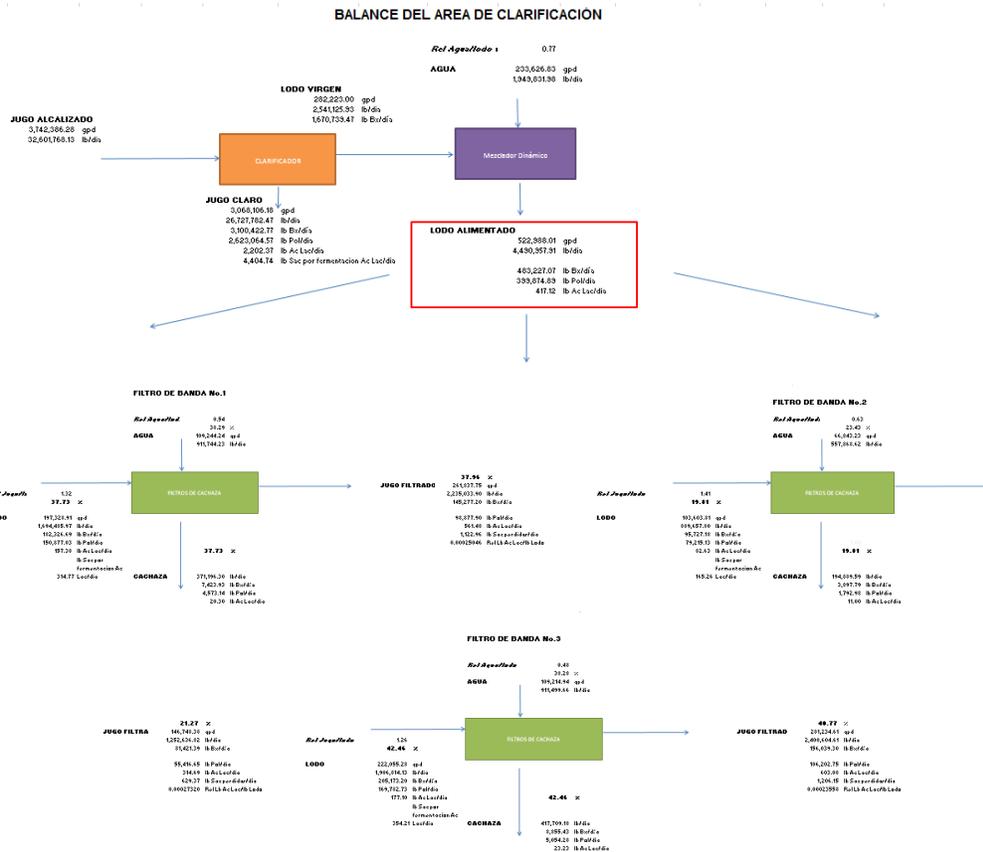


Fuente: fotografia tomada en Ingenios A, zafra 2014-2015.

Continuación del apéndice 5.



• Ingenio C



Fuente: elaboración propia.

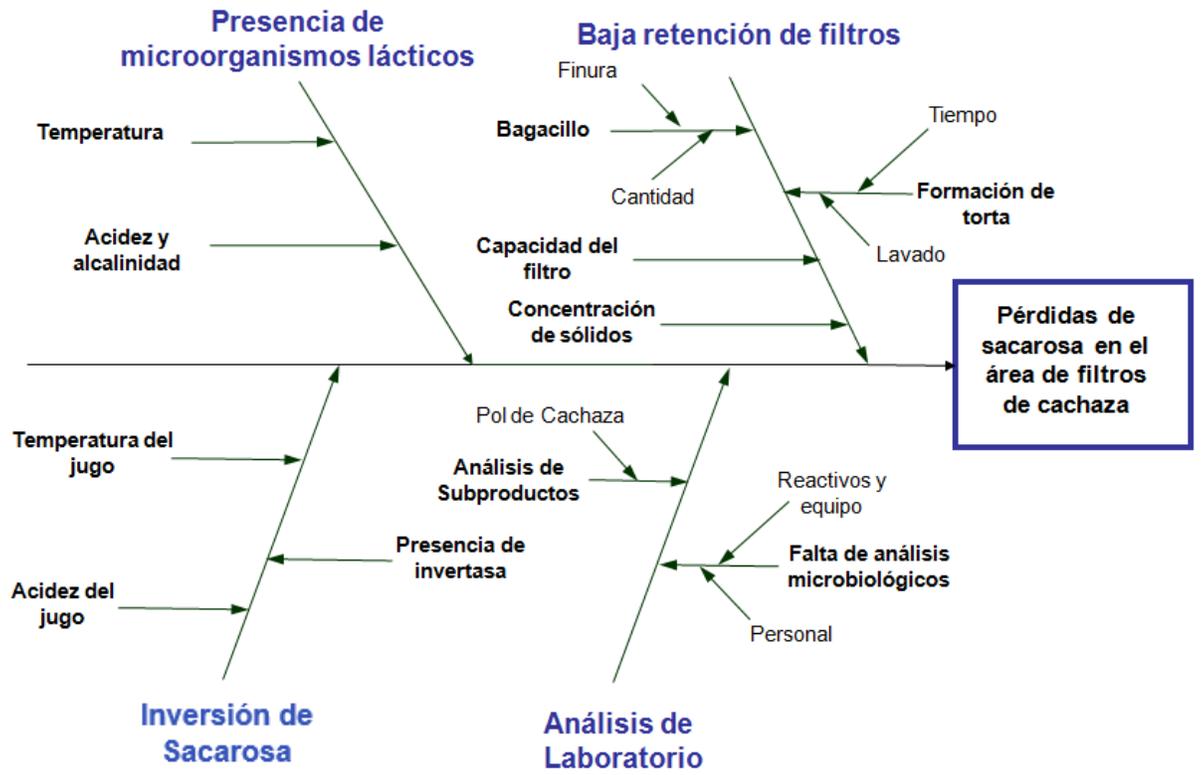
Apéndice 6. **Tabla de requisitos académicos aplicados durante la experimentación**

Licenciatura en Ingeniería Química	Area de Química	Química 4	Soluciones y concentración
		Bioquímica	Carbohidratos y ácido láctico
		Análisis Cuantitativo	Errores en la medición
		Análisis Instrumental	Manejo de equipo
	Area de Operaciones unitarias	Flujo de fluidos (IQ-2)	Equipos y tuberías
		Balance de Masa y Energía (IQ-1)	Balance de corrientes
	Area de Especialización	Operaciones Unitarias Complementarias (IQ-6)	Manejo de sólidos
		Ingeniería Económica 3	Presupuestos e inversiones
	Area de Ciencias básicas y complementarias	Estadística 1 y 2	Muestreo
			Hipótesis
Análisis de datos			

Fuente: elaboración propia.

Apéndice 7.

Diagrama de Ishikawa



Fuente: elaboración propia.

ANEXOS

Anexo 1. Informe de resultados de recuento microbiológico

RESULTADOS				
Tabla 1: Resultados Promedios de Recuentos de mesófilos y termófilos para ambos Ingenios				
Puntos de muestreo	Ingenio A		Ingenio B	
	Mesófilos	Termófilos	Mesófilos	Termófilos
Entrada General	Menos de 10	40	Menos de 10	15
Superficie filtro Prensa	10	15	Menos de 10	10
Bandeja Filtro Rotatorio	410	Más de 3000	370	2400
Rebalse Filtro Rotatorio	670	Más de 3000	360	2800
Jugo Filtrado de F. Prensa	Menos de 10	Menos de 10	10	12
Jugo Filtrado de F. Rotatorios	15	50	20	15

Resultados expresados en Unidades Formadoras de Colonias /gramo de lodo.

- ROJO: Valores altos por encima del valor superior de la prueba.
- NARANJA: Relativamente altos.
- VERDE: Valores bajos. Los de Menos de 10 UFC/ g se encuentran por debajo del límite inferior de la prueba.

Tabla 2: Resultados Promedios de Coeficiente Microbiológico (según Test de Resazurina) para ambos ingenios.

Puntos de muestreo	Ingenio A		Ingenio B	
	Mesófilos	Termófilos	Mesófilos	Termófilos
Entrada General	0.52	0.60	0.51	0.57
Superficie filtro Prensa	0.62	0.79	0.59	0.75
Bandeja Filtro Rotatorio	1.21	1.63	0.95	0.99
Rebalse Filtro Rotatorio	1.30	1.92	0.96	0.97
Jugo Filtrado de F. Prensa	0.46	0.50	0.48	0.49
Jugo Filtrado de F. Rotatorios	0.70	0.73	0.64	0.75

Continuación de anexo 1.

- ROJO: Relativamente muy altos.
- NARANJA: Relativamente altos.
- VERDE: Valores bajos.

ALGUNAS OBSERVACIONES:

1.- En general hubo correspondencia entre:

- Los conteos microbiológicos por el método tradicional y el CM por el Test de Resazurina.
- Los resultados obtenidos para los mismos puntos en cada ingenio.
- Los resultados obtenidos por grupos de temperatura de desarrollo preferencial.
- Los resultados por cada tipo de filtro entre los ingenios.

2.- En general resultó **mayor** los valores de **densidad y actividad microbiológica**:

- Del grupo termófilo que el grupo mesófilo.
- De los lodos en los filtros que el jugo filtrado y el lodo de entrada.
- De los lodos y jugos filtrados pertenecientes al Ingenio A que los pertenecientes al Ingenio B.
- De los lodos y jugos filtrados procedentes de los filtros rotatorios que de los procedentes de los filtros prensa.
- Particularmente resultaron muy altos los valores de densidad y actividad microbiológica en las bandejas y rebalse de los filtros rotatorios en cada ingenio.

CONCLUSIÓN FUNADAMENTAL:

En los Filtros Rotatorios se dan condiciones para el desarrollo microbiano particular y relativamente intenso en las bandejas inferiores, lo que no ocurre en los Filtros Prensa evidenciado por la medición de la densidad y actividad microbiológica en las entradas, dentro y salidas, así como en el jugo filtrado de cada tipo de filtro en diferentes ingenios.



Fuente: datos experimentales, Optimisa S. A., 2015.