

**OPTIMIZACION DEL PROCESO DE CLARIFICACION DE MELADURA
MEDIANTE EL SEGUIMIENTO DE NUEVE VARIABLES FISICOQUIMICAS
EN EL INGENIO RISARALDA S.A**

CAROLINA GOMEZ DE LOS RIOS

UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE TECNOLOGIA

ESCUELA DE QUIMICA

PEREIRA, 2010

**OPTIMIZACION DEL PROCESO DE CLARIFICACION DE MELADURA
MEDIANTE EL SEGUIMIENTO DE NUEVE VARIABLES FISICOQUIMICAS
EN EL INGENIO RISARALDA S.A**

CAROLINA GOMEZ DE LOS RIOS

TRABAJO DE GRADO

Requisito parcial para optar por el título de Tecnólogo en Química.

NORMA PATRICIA DURAN

Química Industrial.

UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE TECNOLOGIA

ESCUELA DE QUIMICA

PEREIRA, 2010

Nota de aceptación.

Presidente del Jurado.

Jurado.

Jurado.

Pereira, (día) _____ (mes) _____ (año) _____

CONTENIDO.

1. RESUMEN.....	15
2. INTRODUCCION.....	16
3. JUSTIFICACION.....	18
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	19
5. OBJETIVOS.....	20
5.1 Objetivo general.....	20
5.2Objetivos específicos.....	20
5.3Resultados esperados.....	21
6. MARCO TEORICO.....	22
6.1Proceso de elaboración de azúcar.....	22
7. MARCO CONCEPTUAL.....	28
7.1 Floculación.....	28
7.2Tensoactivo.....	29
7.3Turbiedad	31
7.4Grados brix.....	32
7.5Grados baumé.....	33
7.6Sulfitación.....	34
7.7Alcalinización.....	36
7.8Lechada de cal.....	36
7.9Sacarato de calcio.....	37
7.10 Cachaza.....	39
7.11 Color.....	40
8. MARCO DE REFERENCIA.....	45

8.1 Marco Geográfico.....	45
8.2 Tipo de estudio.....	45
8.3 Marco de antecedentes.....	46
9. DESCRIPCION DEL PROCESO:	
CLARIFICACION POR FLOTACION DE MELADURA.....	48
9.1 Parámetros importantes que se deben de tener en cuenta para una buena clarificación.....	56
9.1.1 Control de pH.....	56
9.1.2 Contenido de fosfatos en la meladura.....	57
9.1.3 Flujo de dosificación de floculante.....	57
9.1.4 Calidad del agua en la preparación del floculante.....	58
9.1.5 Dosificación de tensoactivo.....	58
9.1.6 Aseos constantes al clarificador de meladura.....	58
9.2 Variables importantes para la optimización de la clarificación de meladura.....	61
9.2.1 Variable manipulable o variable de control.....	61
9.2.2 Variable no manipulable.....	67
9.2.3 Variable de respuesta.....	71
10. CAPACIDAD DE PROCESO Y DE MAQUINAS.....	74
10.1 Análisis de la capacidad de proceso usando gráficos de control e histogramas.....	77
11. PARTE EXPERIMENTAL.....	81
12. ANALISIS DE LABORATORIO.....	83
12.1 Determinación de fosfatos en meladura.....	83

12.2	Determinación de grados brix.....	84
12.3	Determinación de sólidos en fase húmeda.....	84
12.4	Determinación de turbiedad y pH.....	85
12.5	Determinación de sacarosa y pureza.....	85
12.6	Determinación de azúcares reductores.....	86
13.	EQUIPOS Y REACTIVOS.....	87
13.1	Equipos.....	87
13.2	Reactivos.....	87
13.3	Material de vidrio.....	88
14.	RESULTADOS Y DISCUSION.....	89
14.1	Variación de la concentración del floculante.....	90
14.2	Porcentaje de remoción.....	96
14.3	Grados brix en la Meladura.....	102
14.4	pH de la meladura.....	110
14.5	Sacarosa en la meladura.....	115
14.6	Pureza de la meladura.....	120
14.7	Color en la meladura.....	125
14.8	Azúcares reductores.....	131
14.9	Contenido de fosfatos en la meladura.....	138
14.10	Porcentaje de sólidos sedimentables en fase húmeda.....	152
15.	CONCLUSIONES.....	162
16.	RECOMENDACIONES.....	165
17.	BIBLIOGRAFIA.....	168
18.	ANEXOS.....	170

INDICE DE FIGURAS.

Figura 1. Diagrama del proceso para la elaboración de azúcar.....	27
Figura 2. Disoluciones de sacarato de calcio.....	38
Figura 3. Etapas iniciales de la reacción de Maillard. Reordenamiento de Amadori.....	41
Figura 4. Etapas intermedias de la reacción de Maillard. Algunos productos identificados.....	42
Figura 5. Degradación de Strecker.....	42
Figura 6. Últimas etapas de la reacción de Maillard.....	43
Figura 7. Horno rotativo para combustión de azufre y punto de dosificación de ácido fosfórico.....	49
Figura 8. Vista lateral del taque de reacción.....	50
Figura 9. Micronizador.....	51
Figura 10. Cono de dosificación de floculante.....	52
Figura 11. Esquema de la dosificación de floculante.....	54
Figura 12. Clarificador de meladura, vista lateral.....	55
Figura 13. Palto de aire de cavitación.....	58
Figura 14. Tubería principal para desalojo de meladura.....	59
Figura 15. Paletas de remoción de cachaza.....	60
Figura 16. Caja de desborde de meladura clarificada.....	60
Figura 17. Bosquejo representativo de la Tensión superficial para una molécula a diferentes profundidades.....	69
Figura 18. Comparación colorimétrica entre la meladura cruda y la meladura clarificada.....	72

Figura 19. Turbidiméetro HACH 2100N.....	73
Figura 20. Histograma tipo de una población desconocida.....	77
Figura 21. Histograma típico de una población.....	78
Figura 22. Descripción de capacidad de proceso en un histograma típico.....	79
Figura 23. Quinto efecto de evaporación. Concentración de meladura.....	106
Figura 24. Distribución de probabilidad alrededor de la media en una distribución $N(\mu, \sigma)$	124
Figura 25. Grafico de correlación de Pearson, con $r=0$	147
Figura 26. Grafico de correlación de Pearson, con $r=1$	148
Figura 27. Grafico de correlación de Pearson, $r=-1$	148
Figura 28. Distribución general del proceso de evaporación.....	153

INDICE DE GRAFICOS.

Grafico 1. Concentración del floculante Vs. porcentaje de remoción.....	92
Grafico 2. Comportamiento entre la turbiedad inicial y final.....	94
Grafico 3. Comportamiento del porcentaje de remoción.....	95
Grafico 4. Comparación entre la turbiedad inicial y final.....	97
Grafico 5. Comparativo entre la turbiedad inicial, turbiedad final y el porcentaje de remoción para la meladura.....	98
Grafico 6. Comparativo entre los promedios de grados brix en la meladura cruda y clarificada.....	104
Grafico 7. Histograma de frecuencia del brix promedio en la meladura clarificada.....	105
Grafico 8. Relación entre los grados brix en las diferentes etapas de la meladura.....	107
Grafico 9. Relación entre el pH de la meladura cruda y meladura clarificada.....	111
Grafico 10. Comportamiento del pH en la meladura.....	113
Grafico 11. Comportamiento de sacarosa en meladura.....	118
Grafico 12. Comportamiento de la pureza en la meladura clarificada y concentrada.....	121
Grafico 13. Relación entre la pureza y la sacarosa en la meladura concentrada.....	122
Grafico 14. Histograma de frecuencia de la pureza de la meladura concentrada.....	124
Grafico 15. Variación de color en la meladura cruda y meladura clarificada.....	126
Grafico 16. Variación de color y turbiedad en la meladura clarificada.....	127

Grafico 17. Variación de color y turbiedad en la meladura sin clarificar.....	127
Grafico 18. Variación promedio de los azucares reductores en la meladura clarificada y concentrada.....	134
Grafico 19. Correlación entre el pH y el porcentaje de azucares reductores en la meladura concentrada.....	136
Grafico 20. Seguimiento al contenido de fosfatos en la meladura.....	141
Grafico 21. Variación de los fosfatos en la meladura cruda y meladura clarificada.....	144
Grafico 22. Grafico de dispersión matricial entre los fosfatos, pH, turbiedad y °Brix.....	149
Grafico 23. Diagrama de dispersión interactivo entre los fosfatos y el pH.....	150
Grafico 24. Variación promedio de los sedimentos húmedos en la meladura concentrada.....	156
Grafico 25. Variación promedio de los parámetros básicos en la meladura concentrada.....	156
Grafico 26. Variación promedio de los sedimentos húmedos en la meladura clarificada.....	158
Grafico 27. Variación promedio de los parámetros básicos en la meladura clarificada.....	158
Grafico 28. Grafico de dispersión matricial para la meladura concentrada.....	160

INDICE DE TABLAS.

Tabla 1. Resultados para la preparación de sacarato.....	38
Tabla 2. Datos de turbiedad en la meladura.....	93
Tabla 3. Datos de turbiedad inicial y final para la meladura.....	97
Tabla 4. Datos promedio de porcentajes de remoción.....	99
Tabla 5. Valores promedios de grados brix en la meladura cruda y meladura clarificada.....	103
Tabla 6. Datos de grados brix en meladura cruda, clarificada y concentrada.....	107
Tabla 7. Estadística descriptiva de los grados brix en la meladura.....	108
Tabla 8. Datos promedio de pH en meladura cruda y clarificada.....	111
Tabla 9. Estadísticos descriptivos del pH en la meladura.....	115
Tabla 10. Datos del comportamiento de sacarosa en la meladura.....	119
Tabla 11. Datos del comportamiento de pureza en la meladura clarificada y concentrada.....	121
Tabla 12. Relación entre pureza y sacarosa en la meladura concentrada.....	122
Tabla 13. Estadísticos descriptivos de sacarosa y pureza en meladura clarificada y concentrada.....	123
Tabla 14. Estadísticos descriptivos del color y la turbiedad en la meladura cruda y clarificada.....	130
Tabla 15. Variación promedio de azúcares reductores en meladura clarificada y concentrada.....	134
Tabla 16. Correlación entre pH y azúcares reductores en meladura concentrada.....	137
Tabla 17. Estadísticos descriptivos de los azúcares reductores en la meladura clarificada y meladura concentrada.....	137

Tabla 18. Contenido de fosfatos en la meladura cruda y clarificada....	142
Tabla 19. Variación de fosfatos en la meladura cruda y clarificada...	145
Tabla 20. Estadísticos descriptivos de los fosfatos en la meladura.....	146
Tabla 21. Correlación de Pearson en meladura clarificada (Fosfatos).....	146
Tabla 22. Cambios de temperatura, presión y brix de cada efecto del proceso de evaporación.....	154
Tabla 23. Variación de sedimentos húmedos en la meladura concentrada.....	155
Tabla 24. Variación de sedimentos húmedos en la meladura clarificada.....	157
Tabla 25. Correlación de Pearson en la meladura clarificada (sedimentos húmedos).....	160
Tabla 26. Estadísticos descriptivos de las variables básicas y sedimentos húmedos en meladura concentrada.....	161
Tabla 27. Estadísticos descriptivos de las variables básicas y sedimentos húmedos en meladura clarificada.....	161

INDICE DE ANEXOS.

Anexo A. Guía para la dosificación de Maxiphos y floculante según el caudal de la meladura cruda.....	171
Anexo B. Tabla de dosificación de Maxiphos a la meladura cruda.....	172
Anexo B.1 Aforo a la bomba dosificadora de Maxiphos.....	173
Anexo C. Grafico de control para el porcentaje de remoción (turbiedad)...	174
Anexo D. Tratamiento estadístico del porcentaje de remoción (turbiedad)...	175
Anexo E. comportamiento de sacarosa y pureza en la meladura clarificada y meladura concentrada.....	177
Anexo F. Datos correspondientes a la determinación de color y turbiedad en la meladura cruda y clarificada.....	178
Anexo G. Variación del color y la turbiedad en la meladura cruda y meladura clarificada.....	180
Anexo H. Datos correspondientes al análisis de azúcares reductores en la meladura clarificada y concentrada.....	181
Anexo I. variación de los azúcares reductores en la meladura.....	182
Anexo J. Grafico de control para fosfatos en la meladura clarificada.....	183
Anexo K. Tratamiento estadístico para el grafico de control de los fosfatos en la meladura clarificada.....	184
Anexo L. Comportamiento entre la turbiedad, contenido de fosfatos en meladura cruda y meladura clarificada.....	185
Anexo M. Grafico de control para los sedimentos en fase húmeda de la meladura clarificada.....	186
Anexo N. Grafico de control para los sedimentos den fase húmeda de la meladura concentrada.....	187
Anexo O. Flujograma del proceso de clarificación de meladura.....	188
Anexo O.1 Capacidad de los equipos de de clarificación de meladura.....	190
Anexo P. Actividad complementaria: Clarificación de jugo filtrado.....	191

1. RESUMEN

El siguiente documento dará una explicación breve y precisa acerca del funcionamiento del Clarificador de meladura, un equipo ubicado en la sección de Elaboración del Ingenio Risaralda S.A, el cual tiene como fin mejorar la calidad de la producción de azúcar, ya que este es el último paso previo a la cristalización donde se obtendrá en una primera fase el grano de azúcar, y a partir de este estará determinada la calidad del producto final.

Se realizó un seguimiento durante seis meses al funcionamiento del equipo, dentro de la actividad normal de la planta, con el fin de determinar las variables fisicoquímicas que se encuentran implicadas dentro del procedimiento y que afectan la calidad del proceso que se lleva a cabo en esta estación intermedia de purificación, estableciendo el perfil de cada equipo involucrado en el proceso, y los insumos utilizados generando una optima dosificación de los mismos, reflejándose lo anterior en un producto final de buena calidad.

2. INTRODUCCION

La industria azucarera colombiana se encuentra ubicada en el valle geográfico del río Cauca, en la zona sur occidental del país. En este valle como condición excepcional compartida únicamente por Hawái y la zona norte del Perú, se presentan pronunciadas diferencias climáticas entre el día y la noche, condición necesaria para la concentración de sacarosa en la caña. Esta condición privilegiada permite moler caña y producir azúcar a lo largo del año, a diferencia de lo que ocurre en las demás zonas cañeras del mundo, en las cuales la cosecha de caña dura entre cuatro y seis meses. Como consecuencia, los costos fijos de inversión en fábrica, equipo de campo y capital de trabajo por tonelada de caña producida, son la mitad y hasta la tercera parte de los existentes en el promedio de las zonas cañeras del mundo.

Por lo tanto hablar de caña de azúcar en Colombia es hacer referencia a una región que se extiende desde Risaralda (La Virginia) hasta el norte del Cauca (Santander de Quilichao).

Colombia exporta alrededor de un millón de toneladas anuales, equivalentes a la mitad de la producción total de azúcar colombiana, lo cual nos convierte en un oferente de tamaño medio alto dentro de los estándares del mercado internacional del azúcar.¹

El azúcar colombiano es apetecido en el exterior por la calidad del producto, es por ello que el control sobre el proceso de producción debe ser meticuloso asegurando así el producto final de excelente calidad.

El Ingenio Risaralda S.A, ha mejorado su posición económica dentro del mercado nacional e internacional, lo cual se ha logrado con la implementación de equipos que proporcionan una sobresaliente producción, su última importante inversión fue el clarificador SRI, con el fin de aumentar la eficiencia de la etapa de clarificación del jugo clarificado, dado que es un factor determinante en el proceso de elaboración de azúcar blanco, por los beneficios no sólo económicos, sino operacionales que esto representa, ya que de la calidad del jugo clarificado, especialmente en términos de pureza y turbiedad, depende el rendimiento de operaciones posteriores como la filtración, circulación en los tachos, la calidad de los productos y sobre todo el rendimiento en azúcar crudo que es lo más importante.

¹ Información tomada de <http://www.ciamsa.com>

Como se indica anteriormente, es importante mantener una línea de producción impecable que permita la obtención de azúcar de alta calidad, es por ello que la clarificación de meladura es importante dentro del proceso de producción dado a que este proporciona limpieza al material, esta clarificación por flotación es usada en las industrias azucareras para remover las impurezas tanto solubles como insolubles, tales como sólidos suspendidos, materiales coloidales, sustancias colorantes y constituyentes de las cenizas; utilizando como agentes clarificantes la cal, el calor y un floculante.

Los sistemas de clarificación de meladura por flotación, existentes en la mayoría de las ingenios, son oriundos de tecnologías obsoletas, que no garantizan la buena calidad de la meladura, especialmente debido al ineficiente sistema de aireación empleado (generación de microburbujas). La falta de un tratamiento eficaz de la meladura se traduce en un azúcar de menor calidad, con incidencia más grande de color, impurezas y puntos negros.

El proceso de flotación viene siendo empleado hace mucho tiempo para la clarificación de meladura y almíbar en refinerías, siendo reconocido como una herramienta eficiente para la seguridad de obtención de un azúcar de mejor calidad, especialmente en condiciones adversas de la materia prima caña.

Para mejor discusión de las optimizaciones pasibles de ser incorporadas al proceso de flotación de meladura es necesario realizarse un abordaje más detallado de los principios que lo rigen y de las tecnologías existentes.

Por lo que se menciona anteriormente, es importante proponer alternativas factibles que permitan mejorar la eficiencia del proceso de clarificación por flotación de meladura, razón por la cual, se desarrollara un estudio acerca de las variables fisicoquímicas involucradas en el proceso (pH de la meladura, turbiedad, grados brix, dosis de floculante a emplear, fosfatos, sedimentos en fase húmeda, sacarosa, pureza, y azúcares reductores) teniendo en cuenta la calidad de caña molida y por consiguiente la cantidad de sólidos a remover en la operación, con el fin de obtener un conjunto de condiciones con las cuales se logre aumentar el porcentaje de remoción y obtener una turbiedad aceptable en el proceso.

3. JUSTIFICACIÓN

En el proceso de elaboración de azúcar, numerosas modificaciones se han llevado a cabo en la búsqueda de una mayor eficiencia en la producción, con el fin de mejorar la calidad del producto, calificando para potenciales clientes de talla mundial, aumentando así la demanda, por ende las ganancias. Con esta finalidad, se realiza el seguimiento a un proceso intermedio de producción, la clarificación de meladura, considerado de suma importancia, dado que la calidad del azúcar depende en gran parte de la clarificación

El proceso de clarificación de meladura se efectúa con el propósito de eliminar las trazas de sólidos suspendidos en la meladura y obtener un material más claro y brillante.

La meladura es un subproducto resultante de la evaporación del jugo, es la eliminación de un 70%-80% de agua presente en el jugo claro, resultando un líquido más denso de 50-60 °Brix, llamado meladura o jarabe. La cual es usada posteriormente en la cristalización, dándose la formación de masas, que a continuación se lleva a las centrifugas, para darse la separación del grano.

Esta meladura (cruda o clarificada), es sumamente importante en la producción de azúcar, ya que la sacarosa contenida aquí, cristaliza al llevarla a un nivel metaestable de saturación y de simple efecto llamados tachos. El trabajo de los tachos es un proceso de purificación y su función es transformar la mayor cantidad posible de sacarosa en cristales centrifugables. Mientras más alta sea la pureza del material, mayor será su velocidad de cristalización.

En los ingenios, la calidad del azúcar está asociada directamente a la eficiencia del proceso de clarificación de la meladura. La falta de un tratamiento eficaz de la meladura se traduce en un azúcar de menor calidad, con incidencia más grande de color, impurezas y puntos negros.²

Por lo anteriormente mencionado, el Ingenio Risaralda tomó la decisión de realizar un seguimiento a la clarificación de meladura, ya que es necesario mejorar la calidad de este subproducto que después de clarificado, es sometido a el quíntuple efecto de evaporación para conseguir meladura concentrada, y después de una serie de parámetros evaluados, esta puede ser considerada miel virgen, que es también comercializada por el ingenio para ser usada como materia prima en la elaboración de otros productos.

² Clarificación de meladura por flotación. www.engenovo.com.br.

4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con la competitividad del mercado de azúcar, la garantía de una mejor calidad del producto final, se viene traduciendo en uno de los factores más importantes de diferenciación entre los ingenios, fundamental para la consolidación de clientes cautivos y para la obtención de un producto de mayor calidad. Adicionalmente, viene creciendo rápidamente la demanda por la mejora del sistema de clarificación de meladura, debido a la relación costo/beneficio desfavorable hasta el momento.

El proceso de flotación viene siendo empleado hace mucho tiempo para la clarificación de meladura y almíbar en refinerías, siendo reconocido como una herramienta eficiente para la seguridad de obtención de un azúcar de mejor calidad, especialmente en condiciones adversas de la materia prima caña.

Para dar respuesta efectiva al problema citado, el Ingenio Risaralda S.A, ha optado por mejorar las condiciones de operación del clarificador de meladura, optimizando el proceso con la implementación de equipos como medidores de flujo, electrodo para el manejo del pH, control de la dosificación de la solución de ácido fosfórico (Maxiphos), bomba dosificadora de floculante, y bomba dosificadora de tensoactivo. Para lograr esto, se demostrará mediante un seguimiento al clarificador de meladura, como las variables afectan este proceso, entre ellas se encuentra: cantidad de floculante, el flujo de meladura enviada al clarificador, la cantidad y calidad de sacarato (mezcla de meladura concentrada y lechada de cal), el aseo a evaporadores, la calidad del jugo clarificado, la dosificación de la fuente de fósforo, la sulfitación y la calidad de la caña, determinando así la implicación de esta estación en los procesos siguientes de la producción de azúcar. Se evaluarán parámetros como los siguientes: °Brix, pH, Turbiedad (NTU), fosfatos, sedimentos en fase húmeda, color, sacarosa, pureza, y azúcares reductores, observando así el comportamiento de la meladura, permitiendo tomar las decisiones correctas en el momento de generar cambios importantes en el proceso.

En la sección de clarificación de meladura no existe un control sobre las variables químicas y físicas del proceso, es decir no se cuenta con un sistema de monitoreo, lo cual impide que el operador tenga total visibilidad y control sobre el proceso y por ende existe la problemática del manejo de las variables, lo que se traduce en poca eficiencia, debido a la escasa vigilancia que existe. Es de suma importancia generar una comunicación entre el operador de evaporadores y el operador del clarificador, ya que según la cantidad de caña molida, se da una cantidad de flujo de jugo a evaporar, y así mismo, aumenta el flujo de meladura al clarificador.

5. OBJETIVOS.

5.1 OBJETIVO GENERAL.

Optimizar el proceso de Clarificación de Meladura, realizando un seguimiento a las variables fisicoquímicas como el pH, la turbiedad, los grados brix, la dosis de floculante a emplear, el contenido de fosfatos, sedimentos en fase húmeda, sacarosa, pureza, y azúcares reductores presentes en la meladura, para favorecer el proceso de elaboración del azúcar en el Ingenio Risaralda S.A.

5.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.

- Determinar la eficiencia actual del clarificador de meladura dentro del proceso de elaboración.
- Establecer pautas de mejoramiento en el proceso de clarificación de meladura.
- Analizar las variables fisicoquímicas básicas como lo es, la turbiedad, los grados Brix, y el pH, de la meladura sin clarificar y clarificada, para conocer su comportamiento en el proceso.
- Evaluar la ubicación del clarificador de meladura, dentro del proceso de producción, determinando la cantidad de sólidos arrastrados en las tuberías y como estos afectan el producto final, mediante un seguimiento de cantidad de sedimentos húmedos en la meladura clarificada y concentrada.
- Elaborar gráficos de control de las diferentes variables implicadas, que permitan observar la eficiencia del proceso de clarificación, con el fin de ser implementados en fábrica.

5.3 RESULTADOS ESPERADOS.

Para hacer el seguimiento del clarificador de una manera organizada y por tanto que sea eficiente y se pueda seguir utilizando, se han asignado los siguientes indicadores como factores puntuales de cambio en el proceso:

- Correcta dosificación de insumos, como: floculante, tensoactivo, fuente de fosfatos (*Maxiphos*), fuente de calcio (*sacarato*).
- Correcto manejo de los formatos, registros, planes de control, e implementación de gráficos de control para sobrellevar el proceso durante la molienda, observando así los cambios que tolera el producto terminado en consecuencia a las decisiones tomadas para el clarificador de meladura.

6. MARCO TEÓRICO.

6.1 PROCESO DE ELABORACIÓN DE AZÚCAR:

1. El campo y la cosecha de la caña.³

Adecuación y preparación del terreno: Estas labores se realizan antes de la siembra y tienen como objetivo brindar la infraestructura adecuada del terreno para el establecimiento del cultivo.

Incluye las labores de: destrucción de cepas, nivelación, construcción de la infraestructura vial, construcción de canales de riego y drenaje, puentes y alcantarillas, obras de protección como diques y jarillones, obras civiles, estaciones de bombeo y drenaje, preparación y surcada del terreno.



Siembra: Contempla la selección de la variedad de caña a establecer de acuerdo a la zona agro ecológica, evaluación de los semilleros, fertilización, transporte, descargue, acomodada y tapada de la semilla y riegos de germinación.

Cultivo: Hace referencia a las labores culturales, mecánicas y de fertilización realizadas posteriormente al establecimiento de la plantación, suministrándolas adecuada y oportunamente para su desarrollo fisiológico y obtención de alta productividad. Incluye las labores de descompactación mecánica del terreno, fertilización incorporada, aporque, mantenimiento de drenajes, mantenimiento de vías, control fitosanitario, control de malezas, riegos de sostenimiento, aplicación aérea de bioestimulantes y madurantes, y análisis de pre-cosecha y maduración de la caña.

Cosecha: Cuando la caña ha cumplido su proceso de desarrollo fisiológico y maduración, aproximadamente entre los 12 y 14 meses de edad, el departamento de cosecha procede a realizar la selección de los predios a cosechar determinando el tipo de corte a realizar y su sistema de transporte para su procesamiento



³ Información extraída de www.ingeniorisaralda.com

en fábrica.

2. Patios y picado de caña:

En seguida la caña se descarga en las mesas transportadoras para pasar a las desfibradoras que la convierten en pequeños trozos facilitando la extracción del jugo en los molinos. Es aquí cuando comienza la fase de molienda a través de un tadem de molinos que extraen el jugo de la caña



3. Molienda de la caña:

En esta etapa, utilizando la presión ejercida por las mazas o rodillos dentados, se logra la extracción del jugo de la caña. Para mejorar la eficiencia de este proceso, se adiciona agua al bagazo que va hacia el último molino, este proceso se conoce como imbibición; adicionalmente, el jugo extraído en cada molino, se recircula al anterior, lo que recibe el nombre de maceración.



El bagazo que sale del último molino se convierte en el primer subproducto del proceso, que se aprovecha como combustible en las calderas, para producir el vapor utilizado en la generación de energía mecánica y en la generación de energía eléctrica a través de turbogeneradores; el vapor de escape producido en estos equipos, se aprovecha como energía térmica en el proceso de elaboración de azúcar para calentamientos y cocimientos.

4. Clarificación de jugo diluido:

El jugo extraído en los molinos se conduce por medio de bombas de tipo centrífugo hacia el proceso de purificación que consta de las etapas de calentamiento, sulfitación, alcalización, clarificación y filtración. Por medio de estas operaciones, los insumos tales como dióxido de azufre, lechada de cal y floculante forman puentes



con las sustancias extrañas diferentes a la sacarosa presentes en el jugo que transmiten color y bajan la pureza del azúcar final, formándose moléculas más pesadas que sedimentan en los clarificadores de corto tiempo de retención. Este sedimento se envía hacia los filtros rotatorios al vacío donde se recupera la sacarosa remanente y luego la torta resultante a la que ya se le ha extraído la sacarosa recuperable, se envía hacia el proceso de compostaje para la elaboración de mejoradores de suelos a los campos de cultivo de caña por su importante contenido de minerales.

5. Evaporación:

El jugo que ha sido purificado se somete a evaporación en el tandem de evaporación en serie, en arreglo que puede variar de cuádruple a quíntuple. En estas sucesivas evaporaciones, se elimina gran parte del agua contenida en el jugo (alrededor del 80%), resultando un material más denso llamado meladura.



6. Cristalización:

La meladura se envía hacia los tachos al vacío, equipos donde se realiza la cristalización de la sacarosa. Al tacho se introducen núcleos de sacarosa previamente formados, de tamaño homogéneo para lograr un crecimiento de los cristales de azúcar de manera uniforme a expensas del contenido de sacarosa que se traslada de la meladura al cristal.

7. Centrifugación:

Una vez formados los cristales del tamaño y pureza deseados, el producto formado llamado masa cocida se lleva hacia las centrifugas, equipos que giran a muy altas revoluciones por minuto, provistos de una malla de finos agujeros que permiten sólo el trabajo de la miel mientras que bloquea el paso de los granos de azúcar que quedan atrapados en la parte interna de la malla.



La miel separada en la masa cocida tercera de baja pureza, es llamada miel final o conocida comúnmente como miel de purga la cual es un subproducto del proceso fabril y no es retornada al proceso por su bajo contenido de sacarosa; es comercializada para la posterior obtención de otros productos como alcohol, alimento para ganado, ácido acético, y otros productos de importancia industrial.

8. Secado:

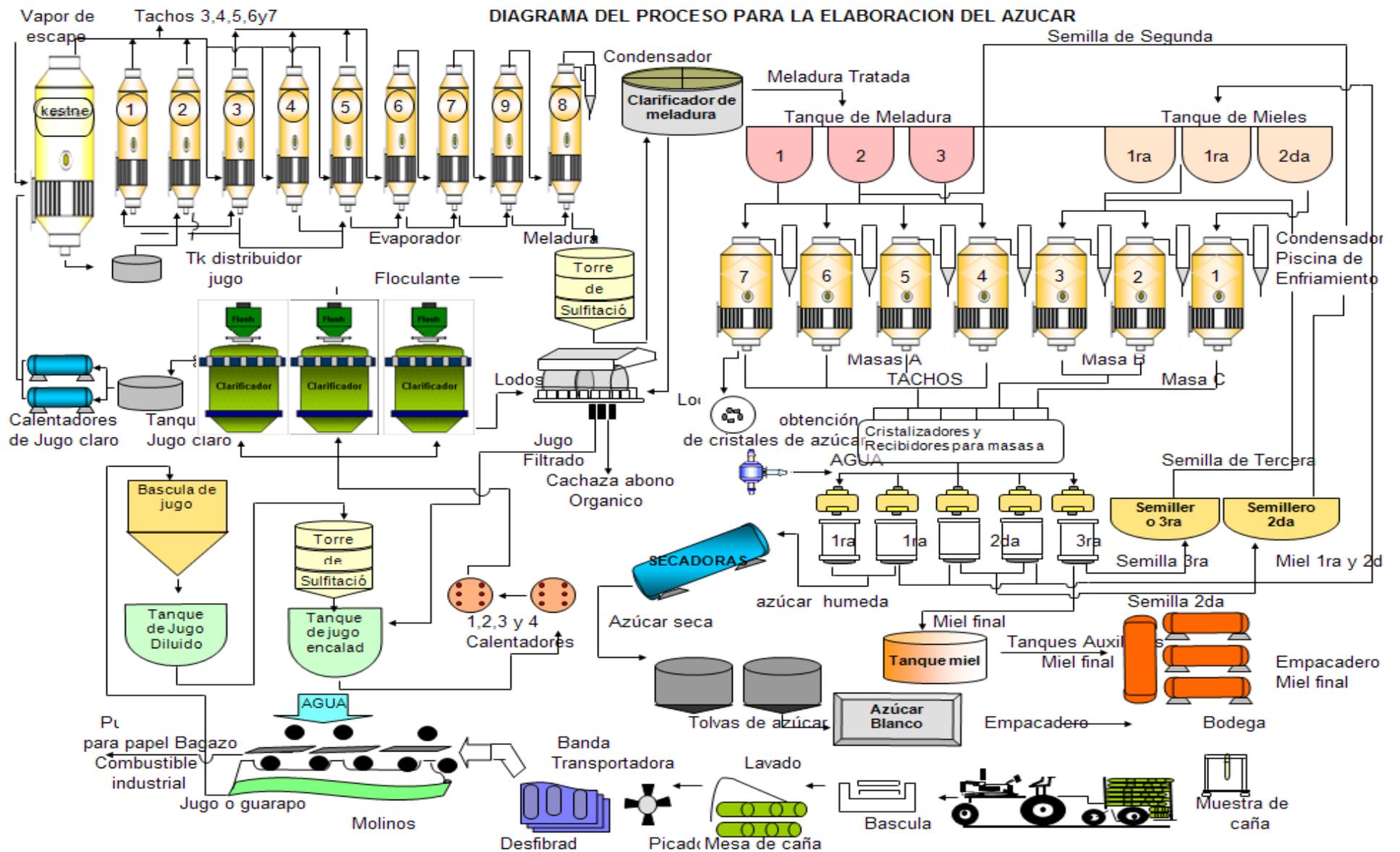
El azúcar libre de la miel se conduce hacia la secadora / enfriadora la cual es un tambor giratorio horizontal con aspas, persianas o colmenas interiores que permiten el contacto del azúcar con aire caliente desde un extremo del tambor, para eliminar la humedad ligada al cristal y a su vez permite el contacto con aire frío por el extremo opuesto para el acondicionamiento térmico de los cristales, de modo que la temperatura de salida de la secadora sea muy cercana a la del ambiente evitando así aterronamiento, debido al carácter higroscópico del azúcar.



9. Empaque:



El azúcar es luego conducido por medio de bandas transportadoras o tornillos sin fin hacia las máquinas clasificadoras donde se selecciona el producto final según la especificación requerida y por último es almacenada en silos o tolvas para ser empacada en las diferentes presentaciones que ofrece el Ingenio Risaralda S.A.



7. MARCO CONCEPTUAL

7.1 FLOCULACION⁴:

Los floculantes, llamados también coadyuvantes de floculación, son productos destinados a favorecer el proceso de floculación es decir, la formación de un flóculo voluminoso, pesado y coherente; la acción puede ejercerse al nivel de la velocidad de reacción (floculación más rápida) o al nivel de la calidad del flóculo. En muchos casos, los floculantes vienen a resolver problemas importantes, tales como flóculos pequeños, de sedimentación lenta, formados durante la coagulación a baja temperatura o flóculos frágiles que se fragmentan al someterse a las fuerzas hidráulicas en los estanques y filtros.

Los floculantes pueden clasificarse por su naturaleza (mineral u orgánica), su origen (sintético o natural) o el signo de su carga eléctrica (aniónico, catiónico o no iónico). Entre los floculantes minerales están la sílice activada y los “agentes adsorbentes ponderantes” (arcillas, carbonato cálcico, carbón activo, tierra de diatomeas) y entre los orgánicos los denominados polielectrólitos.

Inmediatamente después de añadir un coagulante, se desencadenan reacciones con los iones para producir compuestos de las especies polinucleares e hidroxio-multipositivos.

Las sustancias coagulantes se absorben rápidamente en la superficie de las partículas hidrófobas causantes de la turbiedad, que acaban “revestidas de coagulante”. El resultado neto es que las cargas eléctricas de las partículas se reducen; Entonces según el pH y las dosis de coagulante añadidas, la carga de la partícula, medida en función del potencial Z, puede oscilar entre ser ligeramente negativo a neutro.

La mezcla, la agitación o la turbulencia favorecen las colisiones entre las partículas desestabilizadas que producen, de esta forma uniones perdurables, por otra parte, los propios coagulantes aún en ausencia de turbiedad, se hidrolizan y precipitan para formar masas cada vez mayores de material floculante. Cuando este flóculo ha alcanzado tamaño suficiente, puede aprisionar físicamente a las partículas de

⁴ Información tomada de [http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080004/contenido/Capitulo_8/Pages/Proceso_tratamiento_aguas\(b\)_continucion1.htm](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080004/contenido/Capitulo_8/Pages/Proceso_tratamiento_aguas(b)_continucion1.htm)

turbiedad, comportándose como una “escoba” a medida que sedimenta, pero como en este caso se cuenta con un micronizador q inyecta aire al sistema, estos flóculos flotan y así generan el barrido , lo cuales era conocido como Clarificación por flotación.

En contraste, los coloides hidrófilos, que contienen grupos polares de los tipos hidroxilo, carboxilo o *fosfático* (como este caso en particular), cargados negativamente reaccionan químicamente con los coagulantes de carga positiva, producidos en la hidrólisis, para formar otro insoluble que es eléctricamente neutro o desestabilizado. El proceso de floculación prosigue de forma análoga al ya descrito para las partículas hidrófobas.

En general algunos de los siguientes medios favorecen el engrosamiento y consecuentemente, la sedimentabilidad del flóculo:

- Una coagulación previa tan perfecta como sea posible.
- Un aumento de la cantidad de flóculos en la sustancia. Así, conviene ponerla en contacto con los precipitados ya formados por el tratamiento anterior (recirculación de fangos, lecho de fangos, etc.), tratando de conseguir la mayor concentración posible.
- Una agitación lenta y homogénea del conjunto, con el fin de aumentar las posibilidades de que las partículas coloidales descargadas eléctricamente se encuentren con un flóculo.
- El empleo de ciertos productos llamados floculantes.

7.2 TENSOACTIVO:

Los tensoactivos también llamados surfactantes o agentes de superficie activa, son especies químicas con una naturaleza o estructura polar-no polar, con tendencia a localizarse “convenientemente” en la interface formando una capa monomolecular absorbida en la interface.

Las soluciones de tensoactivos resultan ser activas al colocarse de forma de capa monomolecular absorbida en la superficie entre las fases hidrofílicas e hidrofóbicas. Esta ubicación “impide” el trafico de moléculas que van de la superficie al interior de liquido en busca de un estado menor de energía, disminuyendo así, el fenómeno de tensión superficial.

Su clasificación se basa en el poder de disociación del tensoactivos en presencia de un electrolito y de sus propiedades fisicoquímicas, pueden ser: iónicos o no iónicos.⁵

Agentes aniónicos

Los surfactantes aniónicos contienen generalmente uno de cuatro grupos polares solubles - carboxilato, sulfonato, sulfato o fosfato - combinado con una cadena hidrocarbonada hidrófoba. Si esa cadena es corta son muy hidrosolubles, y en caso contrario tendrán baja hidrosolubilidad y actuarán en sistemas no acuosos como aceites lubricantes.

Dentro de esta clasificación se encuentran compuestos como el alquilbencen sulfonato lineal (LABS) objeto de este documento, los alquilsulfatos (AS) derivados principalmente del petróleo, y de alta utilización en la industria de jabones y detergentes.

Agentes catiónico

Los surfactantes catiónicos comúnmente utilizados en detergentes, agentes limpiadores, líquidos lavaplatos y cosméticos están compuestos por una molécula lipofílica y otra hidrofílica, consistente de uno o varios grupos amonios terciarios o cuaternarios.

Las sales de cadenas larga amonio terciarias, obtenidas por neutralización de las aminas con ácidos orgánicos o inorgánicos, son raramente usadas en detergentes y preparaciones para limpieza. Su principal aplicación esta en el tratamiento de textiles y ocasionalmente como suavizantes tipo acondicionador. En aplicaciones cosméticas, su aplicación está restringida a especialidades.

Las sales de amonio cuaternarias con un solo grupo alquilo (C12-C18), o dos grupos más cortos (C8-C10) son usados como sustancias activas antimicrobianos. Debido a su capacidad para adsorber sobre fibras o cabello, los inicialmente mencionados sirven como acondicionadores para el cabello.

Agentes no iónicos

En contraste a sus contrapartes iónicas, los surfactantes no iónicos no se disocian en iones hidratados en medios acuosos. Las propiedades hidrofílicas son provistas por hidratación de grupos amido, amino, éter o hidroxilo. Cuando existe un número suficiente de estos grupos la solubilidad acuosa es comparable con la de los surfactantes iónicos. Las aplicaciones son extensas y dependen de la cantidad de grupos polares presentes, que determinaran la solubilidad tanto en agua como en aceite.

⁵ Tomado de www.quiminet.com

7.3 TURBIEDAD:

Efecto óptico que se origina al dispersarse o interferir el paso de los rayos de luz que atraviesan una muestra, a causa de partículas minerales u orgánicas que el líquido puede contener en forma de suspensión, tales como microorganismos, arcilla, precipitaciones de óxidos diversos, carbonato de calcio precipitado, compuestos de aluminio, etc. La turbiedad es generalmente usada para la caracterización de la eficiencia del tratamiento secundario una vez que, pueda ser relacionada con la concentración de sólidos en suspensión.⁶

Las partículas coloidales se distinguen por su baja densidad relativa (presentan gran área superficial por unidad de volumen) y su capacidad de dispersar la luz. Este fenómeno de dispersión de la luz (efecto Tyndall) típico de los sistemas coloidales, es el que da lugar a la turbiedad.

La turbiedad de una muestra depende de:

- número de partículas
- tamaño de las mismas
- forma
- índice refractivo
- longitud de onda de la luz que incide.

Si bien la turbiedad es un parámetro extremadamente útil en la evaluación de control de la operación de una planta de tratamiento, es necesario hacer algunas consideraciones para evitar errores de concepto.

Las partículas pequeñas, con diámetros menores a $0.1\mu\text{m}$ ($<10^{-7}$ m) prácticamente no dispersan la luz visible. Así, existen muestras con baja turbiedad que presentan altos contenidos de sustancias húmicas o virus.

Por el contrario, partículas de mayor tamaño típicas de arcillas suspendidas, aun en bajas concentraciones, tienen una dimensión que se aproxima a la longitud de onda de la luz en el espectro visible y por lo tanto generan altas mediciones de turbiedad⁷.

⁶ <http://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?Id=2103&termino=Turbiedad>

⁷ <http://www.triwan.com/news/turbi.htm> Marzo-20-2009

Efecto Tyndall⁸:

El Efecto Tyndall es el fenómeno que ayuda por medio de la dispersión de la luz a determinar si una mezcla homogénea es realmente una solución o un sistema coloidal, como suspensiones o emulsiones.

Consiste en que mayor o menor grado todas las sustancias son capaces de dispersar la luz la turbidez que presentan muchas disoluciones es consecuencia de una dispersión intensa de la luz, las disoluciones de ciertas macromoléculas aparecen claras pero en realidad son ligeramente turbias debido a una dispersión de luz débil; solamente un sistema perfectamente homogéneo, pero incluso los líquidos turbios y los gases son ligeramente turbios,

La luz que reciben las partículas es desviada de la trayectoria inicial y se hacen visibles las partículas.

Las soluciones verdaderas son claras y transparentes y no es posible distinguir ni macroscópicamente ni microscópicamente sus partículas disueltas de la fase dispersante. En cambio, las dispersiones groseras presentan un aspecto turbio que se debe a la facilidad con que se visualizan las partículas suspendidas en el medio líquido. En cuanto a las dispersiones coloidales, si bien aparecen perfectamente claras en el microscopio, al ser examinadas de una manera especial se comportan de forma muy singular. En efecto, cuando un rayo luminoso atraviesa un recipiente transparente que contiene una solución verdadera, es imposible visualizarlo a través de ella, por lo que se dice que es una solución ópticamente vacía, esto es, en el ultramicroscopio presentan un fondo negro sin puntos brillantes pero, si dicho rayo penetra en una habitación oscurecida, su trayectoria estará demarcada por una sucesión de partículas que, al reflejar y refractar las radiaciones luminosas, se convierten en centros emisores de luz. Con las soluciones coloidales pasa exactamente lo mismo; sus micelas gozan de la propiedad de reflejar y refractar la luz, con el agregado de que la luz dispersada está polarizada. De este modo, el trayecto que sigue el rayo luminoso en una solución Coloidal es visualizado gracias a las partículas coloidales, convertidas en centros emisores de luz.

7.4 GRADOS BRIX⁹:

Los grados Brix miden la cantidad de **sólidos solubles** presentes en un jugo o pulpa expresados en porcentaje de sacarosa. Los sólidos solubles están compuestos por los azúcares, ácidos, sales y demás compuestos

⁸ <http://www.mitecnologico.com/ibq/Main/EfectoTyndall>

⁹ <http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/agronomia/2006228/teoria/obpulpfru/p7.htm>

solubles en agua presentes en los jugos de las células de una fruta. Se determinan empleando un refractómetro calibrado y a 20 °C. Si la pulpa o jugo se hallan a diferente temperatura se podrá realizar un ajuste en °Brix, según la temperatura en que se realice la lectura. La escala Brix se utiliza en el sector de alimentos, para medir la cantidad aproximada de azúcares en zumos de fruta, vino o bebidas suaves, y en la industria del azúcar.

Los grados Brix (símbolo °Bx) miden el cociente total de sacarosa disuelta en un líquido. Una solución de 25 °Bx tiene 25 g de azúcar (sacarosa) por 100 g de líquido o, dicho de otro modo, hay 25 g de sacarosa y 75 g de agua en los 100 g de la solución.

Los grados Brix se miden con un sacarímetro, que mide la gravedad específica de un líquido, o, más fácilmente, con un refractómetro.

7.5 GRADOS BAUME¹⁰:

Son los grados de la Escala baumé, que miden la densidad de cualquier líquido, habitualmente se utilizan para medir la azucaridad o salinidad o grados de alcohol de un líquido. Un grado Baumé:

$$^{\circ}\text{Bé} = (144.38 (d - 1))/d.$$

Equivale a la densidad de una solución de clorato de sodio a 1%. Asimismo un grado baumé equivale a 25 gramos de azúcar por litro.

Los almíbares o jarabes son una solución de azúcar y agua que se preparan con distintas densidades, es decir, cantidad variable de azúcar disuelto en agua. Para identificar estas variables nos servimos de una escala de medición llamada Baumé, cuyos grados miden la densidad, en este caso, de la solución agua-azúcar. El rango, el intervalo, de los almíbares podemos fijarlo ente 10° a 33° . Un jarabe a 33 de graduación es aséptico. A densidades distintas fermenta. El instrumento para medir el grado de densidad Baumé se llama densímetro.

Resulta que 25 gramos de azúcar disuelto en un litro de agua producen 1° Baumé, para preparar un jarabe a un cierto número de grados, simplemente multiplicamos éste número requerido por los 25 y obtenemos el peso del azúcar para un litro de jarabe, un litro de jarabe a 22° Baumé se consigue multiplicando 22 x 25 = 550 gramos de azúcar; un litro de jarabe a 30° Baumé sería entonces el resultado de 30 x 25 = 750 gramos de azúcar.

¹⁰ http://www.pasqualinonet.com.ar/el_azucar.htm

Relación entre densidad y grados baumé¹¹

La relación entre concentración y densidad de una disolución se utiliza todavía en la industria y laboratorios, al dar la concentración de las disoluciones de algunas sustancias en grados Baumé (°Bé), establecidos en 1768. Esta escala equivale a una escala de densidades, tomando como puntos fijos de aquélla el agua pura y una disolución al 10 % de NaCl.

Para líquidos más densos que el agua, la densidad de ésta corresponde a 0 °Bé y a la disolución al 10 % de NaCl se le adjudican 10 °Bé.

Para líquidos menos densos que el agua se invierte las escalas y el agua pura tiene 10 °Bé y a la disolución al 10 % de NaCl le corresponden 0 °Bé.

La relación entre °Bé y la densidad depende algo de la temperatura. Para una temperatura ambiente de 15° C se pueden usar las relaciones siguientes:

Líquidos más densos que el agua:

$$n = 145 - \frac{145}{d}$$

Líquidos menos densos que el agua:

$$n = \frac{140}{d} - 130$$

Siendo:

n = °Bé (grados baumé)

d = densidad relativa de la disolución respecto al agua a la misma temperatura.

7.6 SULFITACION¹²:

La sulfitación es un procedimiento auxiliar a la fabricación de azúcar, no todas las fábricas de azúcar lo tienen, el procedimiento consiste en la preparación de ácido sulfuroso (SO₂) a partir del azufre, el que tiene los siguientes efectos sobre la sustancia a la cual sea aplicado:

- a. Eliminar las materias colorantes
- b. Transformar en compuestos ferrosos incoloros las sales férricas que pueden transformarse por el contacto de los jugos con los

¹¹ http://gisiberica.com/densimetr%EDa%20are%F3metros/fundamento_teorico.htm

¹² http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S0123-59232004000300006&script=sci_arttext

tanques, tuberías y molinos, (estos compuestos ferrosos afectan el color del azúcar)

El azufre es quemado en hornos especiales (rotativos) desde donde sube el gas por la columna de sulfitación a través de un sublimador y de una chimenea de doble pared con circulación de agua. La sulfitación se puede hacer antes de la alcalinización, se acostumbra hacerla antes, lo importante es llevar al pH final antes de decantar.

La sulfitación tiene como ventaja principal la ayuda notable al color del azúcar.

Este proceso se efectúa con el fin de dar brillo al azúcar, disminuir color, eliminar microorganismos y disminuir viscosidad. La sulfitación proviene del proceso de quema de dióxido de azufre en bandejas que posteriormente produce un gas que es transportado a unas torres donde reacciona con el jugo.

El pH ideal a la entrada de este proceso debe estar entre 5,2 y 5,5; y al final debe estar entre 4,2 y 4,5. Para tener un color más bajo se requiere un pH bajo, sin embargo, se pueden obtener pérdidas si los niveles de pH son muy bajos, ya que la sacarosa sufre un proceso de desdoblamiento, es decir, se invierte en glucosa y fructosa, estado en el cual no se puede efectuar la cristalización.

La cantidad de sulfitos establecida en el Ingenio está entre 200 y 300 ppm (partículas por millón). Si se obtiene una cantidad inferior a la establecida se produciría poca disminución de color, si por el contrario la cantidad de sulfitos es mayor a la establecida, se aumentarían las pérdidas de azúcar por inversión.

Las variables dependientes de la sulfitación son:

- *pH*: Nivel de acidez o alcalinidad de una sustancia.
- *DpH*: Es la diferencia entre el pH a la entrada del proceso y el pH a la salida. Si el Δ pH es inferior a 1, se puede hablar de una mala sulfitación y se obtendrá azúcar de un alto color (azúcar morena o cruda) alejándose del azúcar especial. Si el Δ pH es muy superior a 1, se obtendrá un azúcar de un color muy bueno pero se aumentarán las pérdidas por inversión.
- *Color*: Determina la calidad de los jugos y el azúcar. Se mide en unidades de miliabsorbancia UMA.

7.7 ALCALINIZACION:

Este proceso consiste en agregar cal al jugo que ha sido sulfitado, con el fin de defecar el jugo, neutralizar el pH y disminuir pérdidas por inversión. Esto se logra debido a que la cal reacciona con las impurezas y con ayuda de los fosfatos propios del jugo o meladura se forman unos coágulos.

La variable independiente que se mide en este proceso es el nivel de fosfatos, sustancia inherente al jugo que al reaccionar con la cal y las impurezas permite la formación de coágulos, los cuales se decantan obteniéndose un jugo clarificado. La variable más importante a tener en cuenta es la cantidad de cal que se deposita en el proceso.

Las variables dependientes que se miden en este proceso son el pH y el color.

7.8 LECHADA DE CAL¹³:

La calidad de la cal por emplear al igual que la dosificación, son aspectos importantes que hay que considerar dentro de la purificación de los jugos y material azucarado en general. La cal hidratada es el principal alcalinizante empleado, aunque en ocasiones se emplean otras formas de presentarse la cal. El hidrato de cal para ser empleado en el proceso debe cumplir con las siguientes especificaciones de calidad:

No.	Parámetro	Cantidad (%)
1	Oxido de calcio aprovechable (mínimo)	70
2	Oxido de magnesio (máximo)	2.5
3	Insolubles al ácido clorhídrico	1.5
4	Humedad (máximo)	2.0
5	Sílice en forma de oxido (máximo)	2.0

Es de esperar que para que la operación adecuada de la estación de preparación, la entrega de una lechada de cal con el flujo y la densidad requerida para el proceso se lleven a cabo, deban de cumplirse los siguientes requisitos:

- Capacidad adecuada en los tanques de preparación para que la lechada al momento de su uso en el proceso, tenga al menos, 40 h de haber sido preparada.

¹³ Problemas de la purificación del jugo en Una fábrica de azúcar de caña de una norma De molienda de mediana capacidad. // José M. Domínguez Estupiñán, Minervino Vinent Reve. 2002

- Desarenador, para disolver el hidrato de cal y extraer el excedente de arena sílice y otros materiales indeseables.

- Sistema de abastecimiento de agua condensada

- Sistema de movimiento en todos los tanques para mantener la cal en suspensión.

- Instrumentos para la medición y comprobación de la densidad de la lechada de cal.

Una vez obtenida ya la lechada de cal concentrada, ésta se utiliza para la alcalización del jugo, lo cual se puede realizar mediante uno de los dos procedimientos siguientes:

- Alcalización tradicional.
- Alcalización por sacarato.

Independientemente del método que se va a emplear, la alcalización debe garantizar una estabilidad rigurosa del pH del jugo.

7.9 SACARATO¹⁴:

Es un modo de dosificación de cal para lograr la alcalinización de la meladura; es una mezcla compuesta de lechada de cal y meladura concentrada, en una proporción de 1:3, siendo respectivamente: 75% de cal y 25% de meladura.

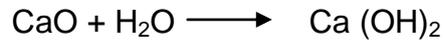
Haciendo uso de la prueba de jarras a diferentes proporciones de meladura /cal, se encontró que esta solución de sacarato, es la adecuada para lograr una buena clarificación, empleando una correcta dosificación, teniendo en cuenta tiempo de sedimentación, turbiedad final y volumen consumido.

Estas proporciones se encontraron anteriormente en un ensayo realizado el año 2008, dado a que el Ingenio Risaralda adquirió un nuevo Clarificador de jugo, Clarificador SRI, para el uso de este nuevo equipo se deben establecer parámetros, la dosificación y composición de sacarato es uno de ellos.

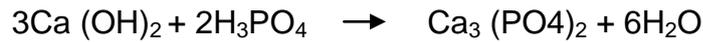
De esta manera encontró que la preparación adecuada del sacarato de calcio es una de las variables más importantes que se debe tener en

¹⁴ Seguimiento de las variables fisicoquímicas del clarificador SRI y verificación de la eficiencia del tacho continuo fletcher smith para la optimización de la elaboración de azúcar en el ingenio Risaralda. Cardona Montoya, Mónica Liliana

cuenta para obtener una clarificación más eficiente, puesto que la cal forma con los fosfatos en una reacción con una elevada temperatura fosfatos tricalcicos facilitando la clarificación. Estas reacciones son validas tanto para clarificación de jugo, como para clarificación de meladura, ya que estas condiciones se encuentran presentes en ambos casos.



Formación de la lechada de cal



Formación de fosfato tricalcico

Tabla 1. Estos fueron los resultados obtenidos en el estudio, para una mejor preparación de Sacarato:

Muestra	pH muestra	pH final	Volumen gastado(mL)	T. sedimentación	NTU final
Sacarato 1:1	11.67	8	9.8	7	478
Sacarato 1:2	11.90	7.5	10	7,59	320
Sacarato 1:3	12.15	7.8	10	6	222
Sacarato 1:6	12.45	8	9	8,4	430

Se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros para la elección de la mejor dilución:

- Volumen gastado en la titulación del jugo diluido
- Tiempo de sedimentación de los lodos
- Turbiedad final del jugo encalado



- 1: Dilución 1:1
- 2: Dilución 1:6
- 3: Dilución 1:2

Figura 2. Disoluciones de sacarato

7.10 CACHAZA

La cachaza es un derivado del aprovechamiento industrial de la caña de azúcar (*Sacharum officinarum*), considerada como la planta que más perfeccionada tiene los mecanismos para la producción de sacarosa y su eficiencia de asimilación de fotosíntesis y capacidad de producir masa verde compuesta por azúcares, almidones, proteína y elementos lignocelulósicos, todos ellos materias primas¹⁵.

La cachaza es el residuo en forma de sedimento que se elimina en el proceso de clarificación del jugo de caña.

La cachaza también es obtenida como, residuo en forma de torta que se elimina en el proceso de clarificación por flotación de la meladura, este residuo es llevado al tanque de encalado de jugo, donde posteriormente se somete nuevamente al proceso de clarificación de jugo de caña, o va directamente a la serie de filtros rotatorios.

La mayor producción de cachaza se encuentra localizada en la clarificación de jugo, dado a que esta es la primera etapa a la que se somete el material para eliminar las impurezas naturales de la caña de azúcar.

Durante la fabricación de azúcar crudo, la cachaza constituye el 17 por ciento de residuos por el uno por ciento de azúcar cristalizada.

Químicamente la cachaza está compuesta por los flóculos formados a partir de los defecantes agregados, las impurezas contenidas en el jugo y ocluidas en el flóculo, y el licor arrastrado.

La cantidad varía entre 2-7% del peso del jugo clarificado o 5-15% del volumen.

La producción de cachaza depende de dos factores, el primero es la calidad del jugo y el grado de clarificación deseado, influyendo aquí la cantidad y naturaleza química de las impurezas, el brix, la temperatura del proceso y la dosificación de floculante y sacarato. El segundo factor es el diseño del clarificador, que proyecta la manera de retirar la cachaza.

¹⁵ http://www.eraecologica.org/revista_18/era_agricola_18.htm?abono.htm~mainFrame

7.11 COLOR:

Coloración formada a altas temperaturas¹⁶:

La coloración formada a altas temperaturas está subdividida en dos grupos:

- Coloración formada por la reacción de Maillard:

La reacción de Maillard (conocidas como reacciones oscurecedoras o pardeamiento no enzimático) es al reacción que ocurren entre los azúcares reductores (como al fructuosa y glucosa) y los aminoácidos a altas temperaturas. La formación de estos colorantes ocurre a través de complejas y múltiples reacciones. Los melanoidinas son buenos ejemplos de de coloración formada por la reacción de Maillard.

Este tipo de reacción produce una alta coloración y viscosidad en el jugo, lo cual disminuye la tasa de cristalización, los productos de la reacción de Maillard tiene un particular olor y sabor. La mayoría de los colorantes formados por la reacción de Maillard son removidos durante la purificación, pero como la alta temperatura es la fuerza que permite su formación, ellos son formados nuevamente durante la evaporación y cristalización.

Etapas de la reacción de Maillard:

- I. Etapa inicial: productos no coloridos, no absorben en el ultravioleta (aproximadamente 280 nm)

Reacción A: condensación azúcar-amina

Reacción B: reordenamiento de Amadori (figura 21)

- II. Etapa intermedia: productos sin color o amarillos, con fuerte absorción en el ultravioleta.

Reacción C: deshidratación de azúcar

Reacción D: fragmentación de azúcar

Reacción E: Degradación de aminoácidos (degradación de Strecker)

- III. Etapa final: productos altamente coloridos.

Reacción F: condensación aldólica.

Reacción G: condensación aldehído-amina y formación de compuestos heterocíclicos con nitrógeno.

¹⁶ Beet sugar handbook. Mossed Asadi. Pagina 329.

Figura 3. Etapas iniciales de la reacción de Maillard. Reordenamiento de Amadori.

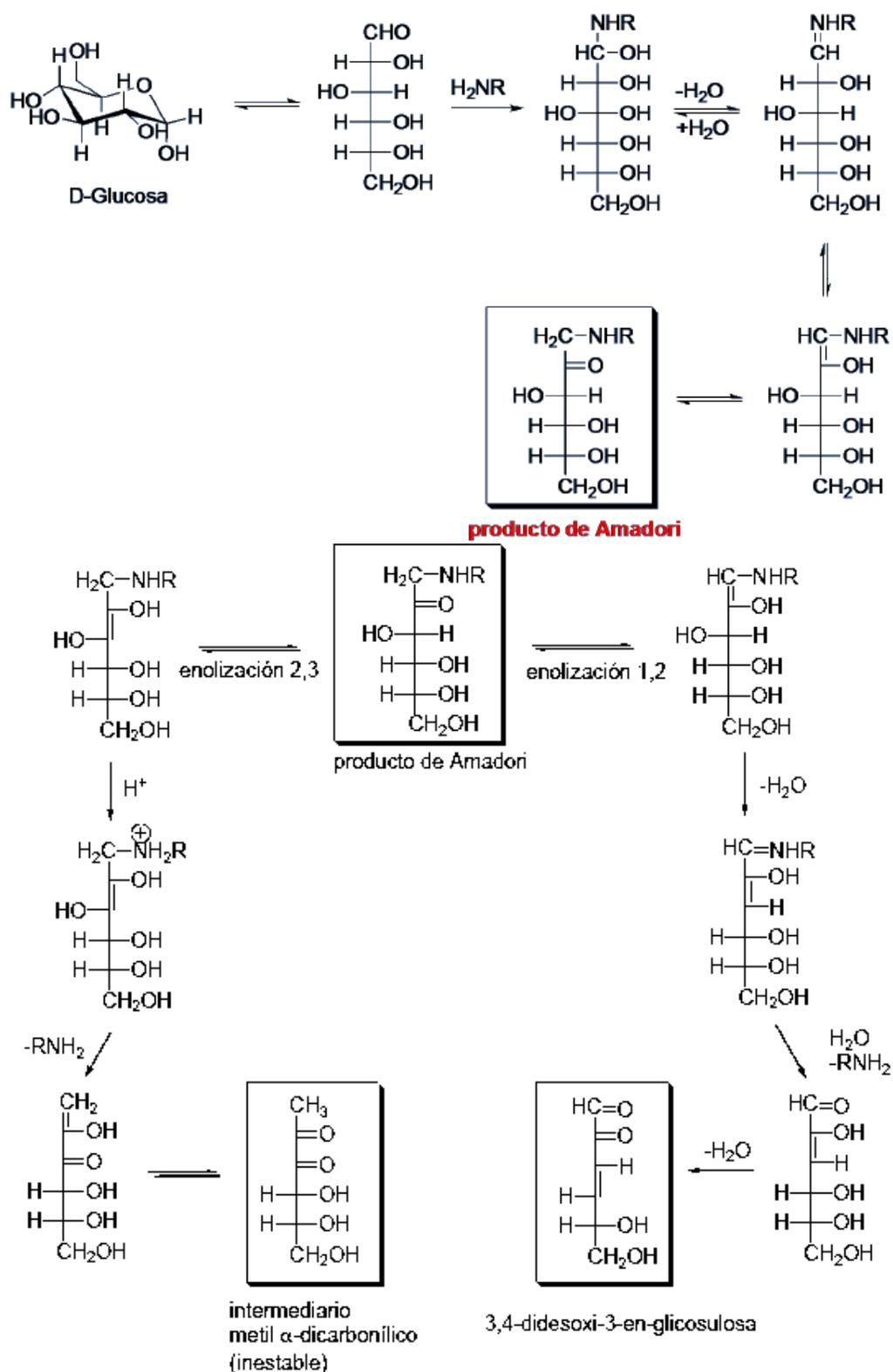


Figura 4. Etapas intermedias de la reacción de Maillard. Algunos productos identificados.

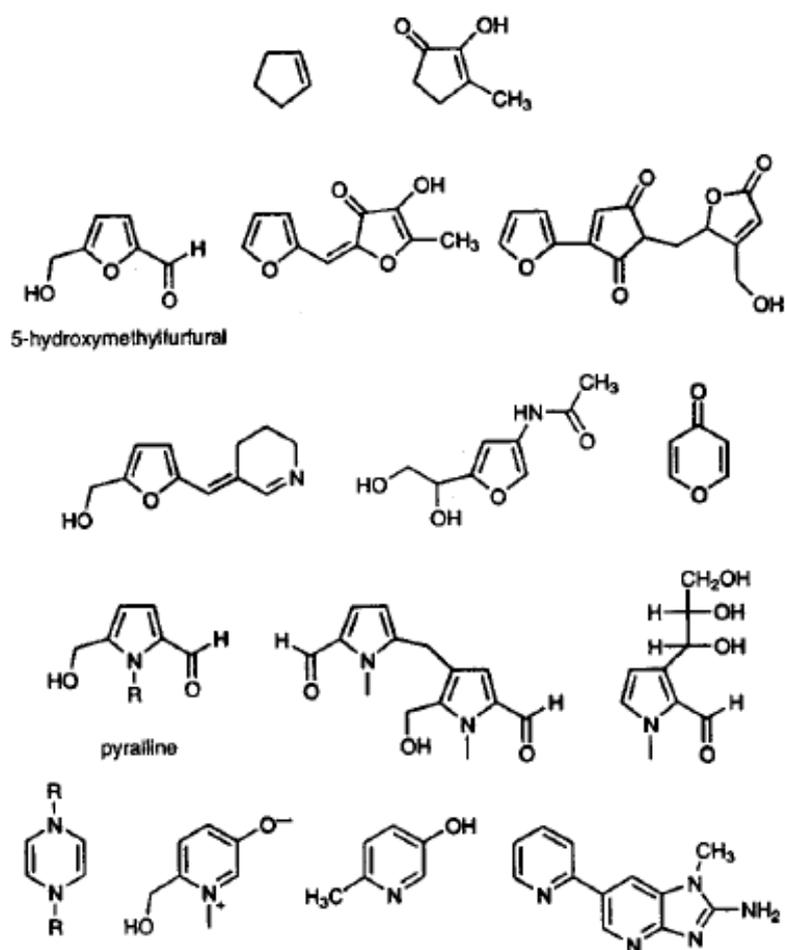


Figura 5. Degradación de Strecker.

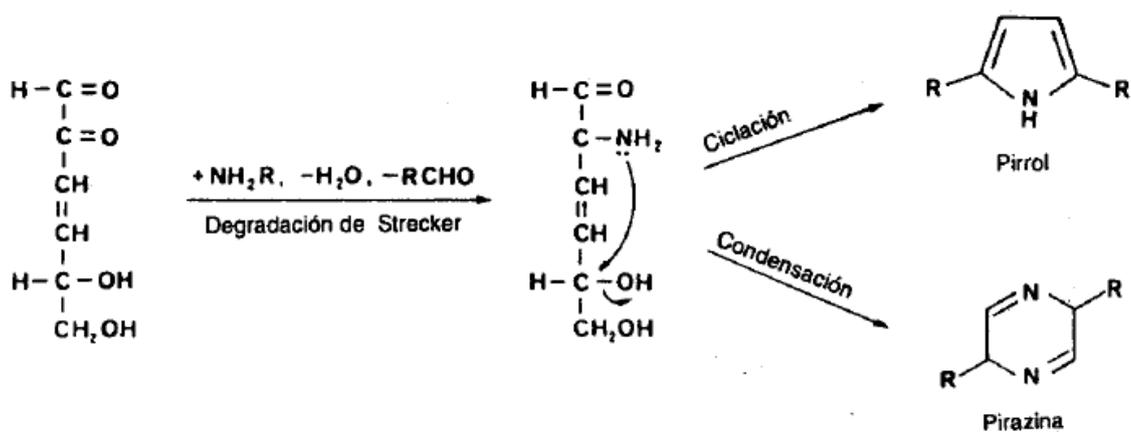
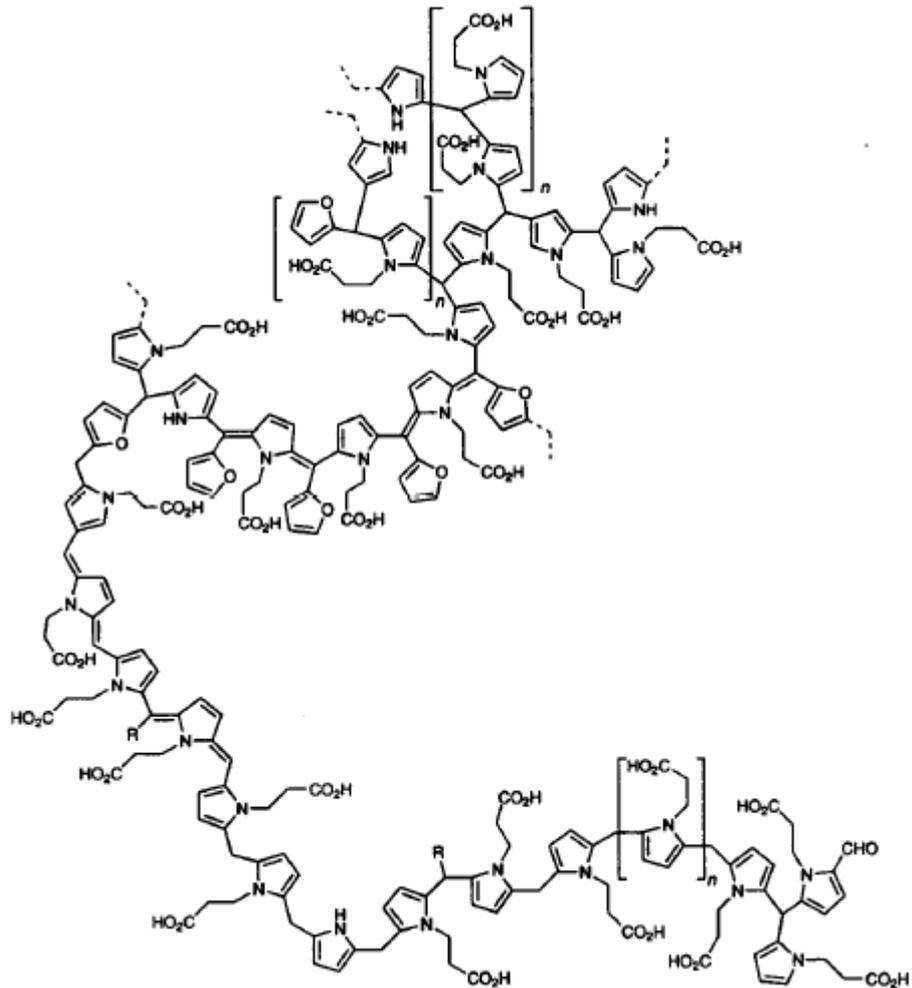


Figura 6. Últimas etapas de la reacción de Maillard:



- Colorantes formados por la reacción de caramelización:

Caramelo es de color marrón, de sabor placentero, es un producto formado al calentar soluciones de sacarosa (azúcar), en términos químicos el caramelo es el producto de la reacción de caramelización formada por la descomposición de la sacarosa en glucosa, fructuosa y finalmente en caramelo, la temperatura cercana a este fenómeno, es la temperatura de fusión (punto de fusión de la sacarosa es de 185°C). Esta reacción es llamada caramelización de azúcar, no ocurre de forma apreciable durante el proceso normal de producción de azúcar.

Las reacciones de Maillard tiene baja actividad cuando el jugo es neutro o es ligeramente ácido.

Las reacciones de Maillard no son activas bajo condiciones alcalinas y condiciones a baja temperatura (como la purificación de jugo), pero pueden activarse bajo condiciones alcalinas en un medio de alta temperatura (como lo es el proceso de evaporación y cristalización).

En resumen, La reacción de Maillard deriva en moléculas cíclicas y policíclicas, en el primer caso se podría nombrar como ejemplo a la unión de los azúcares monosacáridos a causa de la pérdida de una molécula de agua para formar un nuevo tipo de azúcar disacárido (azúcares dobles como podría ser la sacarosa, la maltosa, etc.), en el segundo caso serían proteínas de bajo peso molecular que inciden en la síntesis de otras proteínas. Algunas de estas reacciones son responsables de aportar a los alimentos cocinados sabor y aroma.

La reacción de Maillard es responsable, por tanto, del color y el sabor de los alimentos durante las diferentes formas de cocción, el proceso se inicia cuando se produce la reacción entre una molécula de hidrato de carbono y un aminoácido, sea libre o parte de una cadena proteínica, el resultado es una nueva estructura cuya inestabilidad experimenta nuevos cambios y derivando en cientos de compuestos diferentes. Paralelamente se produce una reacción que otorga la coloración parda y un complejo matiz de sabores provenientes de los múltiples compuestos.

A la mezcla del carbono, hidrógeno y oxígeno pueden añadirse átomos de azufre o nitrógeno gracias a la implicación de los aminoácidos, el resultado es un cóctel de nuevas moléculas y nuevos aromas. Cada alimento tiene su particular reacción de Maillard con resultados que varían según los diferentes métodos de cocción, temperaturas o interacción con otros alimentos.

8. MARCO DE REFERENCIA

8.1 MARCO GEOGRAFICO:

La zona de clarificación de meladura está ubicada en el área de elaboración del Ingenio Risaralda S.A, Una empresa agroindustrial dedicada la transformación de la caña de azúcar a la comercialización de azúcar y sus derivados y a la cogeneración y venta de energía, está ubicado en el corazón del eje cafetero colombiano a escasos 2km. Del municipio de La Virginia.

La sociedad Ingenio Risaralda S.A. se fundó en 1.973 con la participación inicial de la Federación Nacional de Cafeteros, COFIAGRO, el Instituto de Fomento Industrial-IFI-, la Corporación Financiera de Occidente y un grupo de propietarios de tierras de la región. En 1.978 se concluyó el montaje de la maquinaria y equipos, durante el segundo semestre de dicho año se hicieron las pruebas y ajustes con una molienda de 99.000 toneladas. En 1.979 se inició la operación propiamente dicha del complejo agroindustrial. Su molienda en promedio fue de 800 toneladas por día hábil¹⁷.

Las zonas agrícolas del Ingenio Risaralda comprenden una superficie de 13.688 hectáreas netas, adecuadas y sembradas con caña de azúcar, localizadas en los departamentos de Caldas, Risaralda y Valle del Cauca y específicamente en los valles geográficos de los ríos Cauca y Risaralda. El Ingenio Risaralda ha ejercido una marcada influencia socioeconómica en los municipios de Anserma Nuevo, Balboa, Cartago, La Virginia, Pereira, Santuario y Viterbo.

8.2 TIPO DE ESTUDIO

El estudio que se realizara, será de tipo investigativo, ya que es necesario para la producción de azúcar saber cómo se comporta el proceso de clarificación de meladura, y así poder cuantificarlo estableciendo las posibles variaciones en tiempo, lugar y persona. Posterior a esto, se buscan se buscan los factores o variables asociados

¹⁷ www.ingeniorisaralda.com

al fenómeno en estudio y se establecen las posibles relaciones que puedan existir entre las variables de estudio.

Una vez conocidos los factores que intervienen en el fenómeno se hacen estudios experimentales para saber si modificando una o más variables, el fenómeno también sufre cambios.

Para llevar a cabo un excelente método investigativo, se debe tener en cuenta un estudio descriptivo, estudio analítico, estudio experimental, estudios evaluativos, los cuales se deben desarrollar individualmente para obtener resultados óptimos en la investigación.

MARCO DE ANTECEDENTES:

Dentro del contexto industrial, el Ingenio Risaralda S.A, no ha desarrollado ningún estudio fisicoquímico para lograr la caracterización de la meladura.

El último estudio relacionado con el proceso de clarificación de meladura, fue en el año 2007, donde se desarrollo una *Evaluación comparativa del método de sulfitación frente al empleo de peróxido de hidrogeno en el proceso de decoloración de meladura, por la Química Industrial Diana María Flórez Gálvez, de la Universidad Tecnológica de Pereira*. Donde el objetivo principal fue evaluar la efectividad del método de sulfitación, que ha sido por muchos años el más efectivo, frente al uso del peróxido de hidrogeno, en el proceso de decoloración de la meladura para la obtención de azúcar en el Ingenio Risaralda S.A, dentro de esta investigación también se estudiaron como objetivos específicos:

Identificar los aspectos positivos y negativos de ambos métodos durante el proceso de obtención de azúcar.

Determinar la viabilidad del empleo de peróxido de hidrogeno desde aspectos como: economía, efectividad, aplicabilidad y seguridad.

Analizar la efectividad de la decoloración de la meladura aplicando ambos métodos, sustentando con resultados de teoría y análisis llevados a cabo a nivel industrial.

Para cumplir con los objetivos anteriormente mencionados, se realizaron análisis a muestras puntuales de meladura sometida a sulfitación sin una frecuencia determinada durante los meses de noviembre, diciembre del año 2006 y enero 2007, donde se concluyo principalmente:

“En el Ingenio Risaralda la mayor ventaja de la sulfitación continua es el buen resultado que ha dado el método a lo largo de los años, además de la economía frente a otros métodos menos efectivos. Aunque las desventajas siguen afectando el proceso, como incrustaciones en tuberías y calentadores, riesgo a exposición a vapores de azufre y emisiones de gases de SO_2 a la atmosfera, el sistema ha sido efectivo en el objetivo de remoción de color con una relación costo-beneficio razonable.

Las ventajas del peróxido de hidrogeno a corto plazo son: la desinfección reconocida por la naturaleza del producto, la efectiva calificación pero con dosificación acertada, bajo o nulo residual de producto asegurando un azúcar mas blanco durante más tiempo, no contamina el medio ambiente ya que este producto se descompone en oxigeno y agua, no es toxico para la salud humana, aunque su manipulación debe ser cuidadosa para evitar quemaduras. A largo plazo se podría esperar la disminución de incrustaciones en tuberías y calentadores aumentando el rendimiento en estos equipos.

La mayor desventaja y la razón por la cual se decidió no utilizar el peróxido de hidrogeno fue la similitud en la remoción de color de la meladura comparado con el SO_2 y finalmente el precio del producto es seis veces mayor al precio del azufre, por esta razón para validar el producto este debería haber tenido una remoción de color mínimo tres veces con respecto a la remoción de color al utilizar azufre.¹⁸”

¹⁸ Evaluación comparativa del método de sulfitación frente al empleo de peróxido de hidrogeno en el proceso de decoloración de meladura. Diana María Flórez Gálvez. 2007.

9. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO:

CLARIFICACION POR FLOTACION DE MELADURA.

El jugo extraído de los molinos se lleva al proceso de purificación que consta de dos etapas de calentamiento, sulfitación, alcalinización, clarificación, y filtración.

El jugo claro, previamente sometido al proceso descrito, es conducido al tándem de evaporación en serie. Del cuarto efecto de evaporación resulta una sustancia más densa llamada meladura, la cual se trasporta hacia el tanque pulmón de meladura que tiene una capacidad de $58,5 \text{ m}^3$, es allí donde la meladura reposa por un tiempo aproximado de 5-10 min, pero este tiempo de residencia depende del flujo de material proveniente de evaporadores que llega al tanque pulmón que cambia constantemente debido a la molienda de caña dado a que se trata de un proceso continuo; en este momento la meladura antes de ser bombeada a la torre de sulfitación es dosificada con ácido fosfórico (*Maxiphos*) que será la fuente de fosfatos que permitirá la clarificación, el flujo de este insumo es calculado a partir de la molienda y el flujo de meladura que el tanque pulmón envía al clarificador, de allí es llevado a la torre de sulfitación, ya que los gases de SO_2 poseen propiedades decolorantes, reductoras y antisépticas. Del tanque pulmón de meladura se bombea por medio de dos bombas disponibles hacia un tanque de almacenamiento provisional similar al de jugo ubicado en la parte superior de la torre de sulfitación de meladura. De este tanque la meladura desciende hacia la parte superior de la torre haciendo un recorrido en forma de u horizontal para evitar que la meladura ingrese a la torre de manera turbulenta. Esta operación se efectúa con el propósito de eliminar las trazas de sólidos suspendidos en la meladura y obtener un material más claro y brillante, lo cual incide directamente en las etapas de evaporación y de cristalización, posteriores, las cuales son importantes para la obtención de un buen producto final. Los gases de combustión de dióxido de azufre necesarios para el proceso de sulfitación se generan en un horno rotatorio el cual posee una pequeña tolva a través de la cual se dosifica el azufre sólido por medio de un vibrador mecánico. En esta tolva se adiciona una cantidad establecida de azufre (100 Kg por turno) y a medida que transcurre la combustión el vibrador dosifica pequeñas cantidades de azufre al horno. La rotación del horno se emplea para mejorar la combustión y obtener una mejor calidad de los gases. La temperatura de estos gases debe estar por encima de 235°F para que se pueda presentar auto ignición.

El horno cuenta con un sistema de enfriamiento con agua clarificada para proteger el material de construcción del horno de sobrecalentamientos y

desgastes por corrosión. Cabe anotar que no se puede dejar reaccionar el agua con el dióxido de azufre, pues a través de una serie de reacciones se forma ácido sulfúrico. A la salida del horno de combustión se tiene una cámara apagallamas que tiene con finalidad evitar que pasen llamas hacia las tuberías de ascenso de gases y pueda dañarlas. Este apagallamas tiene en su interior una serie de pasos especie laberinto que favorecen el apagado de los gases de salida de dióxido de azufre.

A la salida del apagallamas se tiene una tubería bifurcada, de forma que se pueden enviar los gases a dos destinos diferentes, a sulfitación de jugo o a sulfitación de meladura. Para restringir el paso a uno de los destinos normalmente se tapa la brida con una lámina y se sella por medio de tornillos. El sistema de enfriamiento en la tubería que conduce tanto a sulfitación de jugo como de meladura cuenta con dos enchaquetamientos para refrigeración por cada línea independiente. A temperaturas elevadas el dióxido de azufre se descompone.



Horno rotativo.



Punto dosificación de H₃PO₄

Figura 7. Horno rotativo para combustión de azufre y punto de dosificación de ácido fosfórico.

La meladura sulfitada se envía por una línea hacia la estación de clarificación. Se tiene la posibilidad de by-passear la torre de sulfitación y enviar directamente la meladura hacia el clarificador utilizando la misma línea de salida de la torre.

Al llegar al proceso de clarificación, esta meladura tiene una temperatura aproximada de 85°C, por lo cual no es necesario utilizar calentamiento previo adicional para que se dé el proceso; En el tanque de reacción se da la dosificación de insumos químicos, pues las propiedades fisicoquímicas del material no son óptimas para una buena clarificación, como la acidez, para ello se adiciona sacarato, y tensoactivo.



Figura 8. Vista lateral del taque de reacción. Clarificación de Meladura.

1. Punto de adición del sacarato de calcio.
2. Punto de dosificación de tensoactivo.
3. Mezcladora del tanque de reacción.

La meladura llega al segundo tanque donde esta se encuentra con el micronizador el cual proporciona la aireación para que se pueda generar la fosflotacion, en el tanque de aireación se tiene un plato de cavitación que distribuye aire micronizador a la meladura para que las impurezas se adhieran a éste y floten en el clarificador.

La flotación como proceso de descontaminación se realiza con microburbujas, de diámetros del orden de 15-100 μm (micrómetros) y con burbujas medianas (100-600 μm). En el primer caso, la capacidad de remoción de carga de estas burbujas es muy pequeña, Las burbujas se añaden, o se induce su formación, mediante el método de Aireación a presión atmosférica (flotación por aireación). Se suelen añadir determinados compuestos químicos para facilitar el proceso de flotación. En su mayor parte, estos reactivos químicos funcionan de manera que crean una superficie o una estructura que permite absorber o atrapar fácilmente las burbujas de aire, se pueden emplear diversos polímeros orgánicos para modificar la naturaleza de las interfaces aire-líquido, sólido líquido, o de ambas a la vez. Por lo general, estos compuestos actúan situándose en la interface para producir los cambios deseados. En los sistemas de flotación por aireación, las burbujas de aire se introducen directamente en la fase líquida por medio de difusores o turbinas sumergidas. La flotación por vacío consiste en saturar de aire la meladura directamente en el tanque de

aireación (micronizador), al aplicar un vacío parcial, el aire disuelto abandona la solución en forma de burbujas diminutas. Las burbujas y las partículas sólidas a las que se adhieren ascienden entonces a la superficie para formar una capa de espuma que se elimina mediante un mecanismo de raspado superficial. La arena y demás sólidos pesados que se depositan en el fondo, se transportan hacia un tubo central de fangos para su extracción por bombeo y será conducida al tanque de espuma. La materia flotante se barre continuamente hacia la periferia del clarificador, para luego ser enviado por gravedad hasta un tanque pequeño de almacenamiento ubicado debajo del clarificador de donde posteriormente es bombeado al tanque mezclador de cachaza o en algunas ocasiones al tanque de encalado para su recirculación.

El material aireado sale por el fondo del tanque de aireación para alimentar por gravedad al clarificador de meladura por la parte inferior central de éste, con una previa dosificación de floculante.



Figura 9. *Micronizador. Clarificación por flotación de meladura.*

Después de que la meladura ya ha sido neutralizada con el sacarato, y se le ha adicionado el tensoactivo recibe una dosificación de floculante diluido con agua caliente con una concentración final de 0.05% y con un flujo de dosificación de 10-12 L/min, este debe mantener monitoreado ya que debe variar según el flujo de meladura que esté llegando del tanque pulmón, con el fin de que la clarificación sea lo mejor posible.

El floculante que ha sido preparado tres horas antes en el tanque de maduración, por medio de dos bombas dosificadoras del reactivo. El floculante alcanza una concentración de 0,2% en el tanque de maduración y disminuye su concentración a 0,05% cuando se diluye el reactivo con la misma cantidad de agua, es esta es la concentración con la que se trabaja en esta etapa de clarificación.

Los flóculos producidos en la floculación primaria (fosfatos tricalcicos) se generan en el momento de dosificar la fuente de fosfatos (maxiphos) y

reacciona con el calcio presente en el sacarato de calcio, estos son muy pequeños y frágiles y tienden a romperse con el movimiento del material, por tal razón se debe adicionar una solución de floculante que una los flóculos primarios, formando un aglomerado de muchos flóculos básicos, la cual será más resistente y dará forma a la llamada “torta”, esta etapa es llamada floculación secundaria, que es removida usando un raspador de aletas.



Figura 10. Cono de dosificación de floculante. Clarificación de Meladura

1. Dosificador de Floculante a 0.1%.
2. Dosificación de Agua caliente.
3. Tubería de destaponamiento de floculante.
4. Cono mezclador de Floculante 0.05%

Quien cumple esta importante función es el floculante FLOPAM AN 934 VHM, que es una poliacrilamida en un medio cargado anionicamente, es usado como floculante o coagulante en una gran variedad de aplicaciones, en minería, tratamiento de agua, entre otros.¹⁹

Para que este floculante actúe de una manera adecuada de cumplir con unas características de preparación, A continuación se muestra los cálculos que cumplen con la elaboración del floculante utilizado, con su respectiva dilución:

¹⁹ <http://www.snfinc.com/cppowdersanionic.html>

$$\frac{2 \text{ Kg}}{11 \text{ m}^3} \times \frac{1000 \text{ g}}{1 \text{ Kg}} \times \frac{1000 \text{ mg}}{1 \text{ g}} \times \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} \times \frac{1 \text{ g}}{1000 \text{ mg}} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}} \times 100 \text{ mL} = 0.2\%$$

Esta es la concentración inicial del floculante que se encuentra en el tanque de maduración 0.2%, que al realizar una dilución $\frac{1}{4}$ el floculante queda con una concentración de 0.05%, concentración que es utilizada en la etapa de clarificación de jugo diluido²⁰.

Volumen del tanque de preparación = 11 m³

Volumen del tanque de maduración = 11 m³

Cantidad adicionada cada tres horas = 6 Kg

Esquema de dosificación de floculante:

Especificaciones del Tanque de preparación y maduración de floculante:

- Diámetro 2.2 m
- Altura Recta 3 m
- Volumen recto 11 m³

Preparación de floculante:

- Agua 11m³
- Concentración 0.2%
- Concentración 2000 ppm
- Consumo de floculante 22 Kg
- Consumo de floculante por hora 2.2 Kg/h

Datos Tanque Dosificador:

- Diámetro 2.2 m
- Altura recta 3 m
- Volumen recto 11 m³
- Tiempo de residencia: 10 horas

Dosificación de Floculante al clarificador de meladura:

- Concentración floculante 0.2% 2000 ppm
- Concentración Floculante diluido 0.5% 500 ppm
- Flujo de floculante 10-12 L/min

²⁰ Seguimiento de las variables fisicoquímicas del clarificador SRI y verificación de la eficiencia del tacho continuo fletcher smith para la optimización de la elaboración de azúcar en el ingenio Risaralda. Cardona Montoya, Mónica Liliana

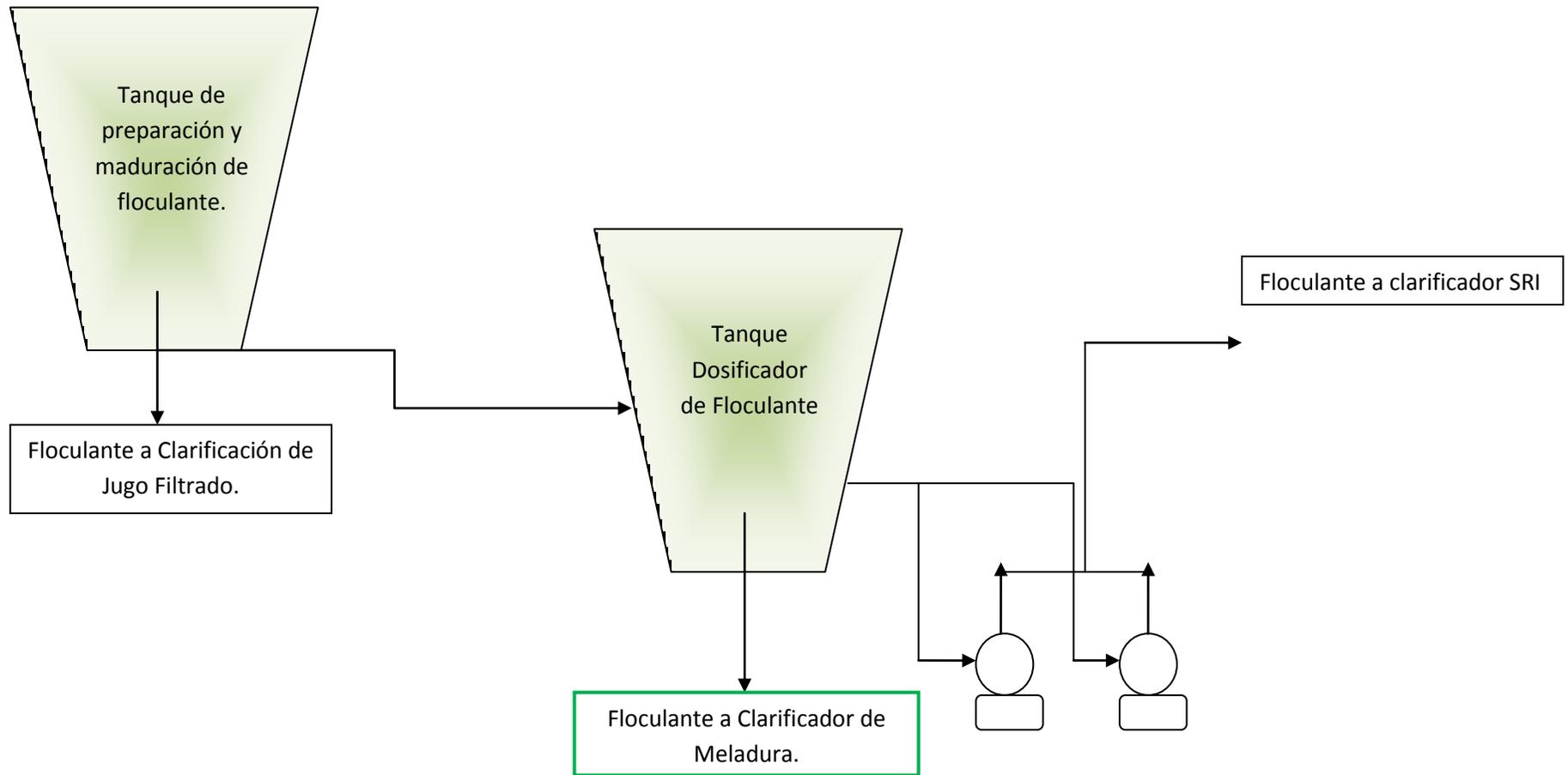


Figura 11. Esquema de la dosificación de floculante.

Los anteriores datos de dosificación de floculante para la clarificación de meladura no son constantes, ya que estos varían de acuerdo al flujo de meladura que se esté tratando que fluctúen entre 40 m³ y 75 m³, en el anexo A Se muestra una tabla de dosificación de la fuente de fosfatos (*maxiphos*) y floculante respecto al flujo de meladura.

La mezcla obtenida ya aireada se conduce al tanque clarificador de meladura, aquí los coágulos generados son atrapados por el floculante. Este proceso disminuye la materia colorante y el material resultante es denominado meladura clarificada. La mezcla permanece en este lugar por 20 minutos aproximadamente, con un movimiento continuo y un raspador que elimina la cachaza superficial “torta” que va siendo generada por el proceso, en esta etapa del proceso no hay variación significativa de la temperatura ya que solo oscila $\pm 3^{\circ}$ C respecto a la temperatura inicial, el tiempo de residencia y la temperatura no deben sobrepasar los parámetros ya dichos, debido a que se puede generar fácilmente un proceso de inversión de la sacarosa, lo cual afecta el resto del proceso de clarificación y de evaporación, obteniéndose así un producto final de poca calidad no cumple con las especificaciones mínimas y debe ser reprocesado. La meladura que se obtiene, la meladura clarificada desborda a una caja que se encuentra al lado lateral del clarificador, de allí por gravedad pasa al tanque de meladura clarificada, donde es bombeado a una nueva etapa de evaporación.



Figura 12. Clarificador de meladura. Vista lateral.

Esta meladura clarificada se somete a un nuevo tándem de evaporación, para así lograr su concentración, que posteriormente tomara el nombre de meladura concentrada, y será utilizada a continuación en el cocimiento en tachos para lograr la cristalización completa de las masas.



Los cristales de azúcar se separan de la miel restante en las centrífugas, Las mieles vuelven a los tachos, o bien se utilizan como materia prima para la producción de alcohol etílico en la destilería.

En los ingenios, la calidad del azúcar está asociada directamente a la eficiencia del proceso de clarificación de la meladura. La falta de un tratamiento eficaz de la meladura se traduce en un azúcar de menor calidad, con incidencia más grande de color, impurezas y puntos negros.

Esta meladura es sumamente importante en la producción de azúcar ya que la sacarosa contenida en la meladura (cruda o clarificada) cristaliza al llevarla a un nivel metaestable de saturación y de simple efecto llamados tachos. El trabajo de tachos es un proceso de purificación y su función es transformar la mayor cantidad posible de sacarosa en cristales centrifugables. Mientras más alta sea la pureza de un material, mayor será su velocidad de cristalización.

9.1 Parámetros importantes que se deben de tener en cuenta para una buena clarificación:

9.1.1 Control de pH

Para una buena clarificación es importante que durante todo el proceso allá un control de pH para evitar la inversión de la sacarosa, para ello debe haber una adecuada adición del sacarato de calcio sobre la meladura cruda, para que esto sea correcto es necesario tener las siguientes condiciones presentes:

- La mezcla de sacarato de calcio-meladura debe ser homogénea y rápida, a una temperatura constante.
- El color del Sacarato no debe variar constantemente, debe ser una mezcla de tono permanente.
- La composición del sacarato debe ser verificada constantemente, para garantizar una proporción de 1:3, con 75% de cal y 25% de meladura concentrada.

- El flujo de sacarato de calcio debe ser constantemente monitoreado por el operador dado a que no se tiene un Flujometro que permita observar correctamente el flujo de sacarato que deba entrar al sistema, es recomendable que al ser un parámetro tan importante se implante este tipo de equipos adicionales para tener un mejor control de las variables.
- Constantemente se debe verificar el pH con cinta indicadora universal como a manera de control, es recomendable disponer de un dispositivo electrónico que alerte al operador de un bajo o alto pH, o en ciertos casos la ausencia de la adición de sacarato que es una situación común dado al taponamiento de la tubería por las incrustaciones, ya que este baja por gravedad.

9.1.2 Contenido de fosfatos en la meladura:

El contenido de fosfatos en la meladura debe ser constantemente monitoreado, tanto en meladura cruda como en la meladura clarificada, dado a que la concentración inicial, no debe ser muy alta dado a que posteriormente se adicionara una fuente de fosfatos, y no debe haber una sobredosificación; en la meladura clarificada se debe igualmente tener un control para verificar que la cantidad de fosfatos en la meladura sea menor a la cantidad inicial, así hay mayor seguridad y tranquilidad respecto a la calidad de la misma, ya que al está ser concentrada, podrá ser catalogada como miel virgen .

9.1.3 Flujo de dosificación de Flocculante:

La dosificación de este insumo es muy importante ya que varía según el flujo de meladura, por ello el operador encargado debe estar constantemente observando estas variables, y pueda usar la siguiente fórmula para recalculer cada vez que sea necesario el Flujo que se necesite para que la clarificación sea la mejor.

$$\text{Rata de flujo de flocculante (m}^3\text{/h)} = \frac{\text{Flujo de Meladura Cruda} \times \text{ppm deseadas}}{\text{concentracion de flocculante} \times 10000} \times \frac{1000}{60}$$

Más adelante se estudiara este caso en particular y se demostrara la cantidad necesaria de flocculante que se debe usar para obtener un buen porcentaje de remoción, y se podrá observar en el anexo A Una tabla de dosificación de flocculante respecto al flujo de meladura.

9.1.4 Calidad del agua en la preparación del floculante ²¹

Para garantizar una buena preparación de floculante, se deben tener en cuenta los siguientes parámetros para el agua de dilución:

- Buena calidad
- PH mayor de 8.0
- Baja dureza
- Con una temperatura menor a 50 °C

9.1.5 Dosificación del tensoactivo:

Para este parámetro no es necesario tener una dosificación establecida, ya que el flujo de este insumo varía respecto a la “calidad” del material que se está clarificando, ya que el objetivo principal de este es disminuir la tensión superficial para evitar que la espuma que se genera en el proceso no interrumpa con el mismo, ya que se pueden dar derrames y se pierde gran cantidad de material útil para trabajar, pero el operador sí debe estar pendiente de la bomba que se usa para desempeñar este trabajo ya que falla constantemente y deja al proceso sin este insumo.

9.1.6 Aseos constantes al Clarificador de Meladura:

Durante el proceso de aireación se hace uso de un micronizador, que es el encargado de airear la meladura para poder generar la flotación necesaria en la clarificación, este micronizador consta de 6 pisteros que conducen el aire a presión, ellos constantemente se taponan por diferentes motivos, lo cual no es conveniente dado que este paso en el proceso es indispensable para una excelente clarificación, por ello el operador debe ser cauteloso con su limpieza.



Figura 13. Plato de aire de cavitación.

²¹ Seguimiento de las variables fisicoquímicas del clarificador SRI y verificación de la eficiencia del tacho continuo Fletcher Smith para la optimización de la elaboración de azúcar en el ingenio Risaralda

El Plato de aire de cavitación. Es un dispositivo en forma de plato provisto de boquillas conectadas mediante conductos a un tubo que actúa como eje principal y que posee una abertura en la parte superior, de forma que cuando las boquillas chocan con el fluido se crea un vacío que induce al aire a entrar por la abertura del eje y lo dispersa en el seno del fluido

El equipo consta en su centro con un “serpentín” que se encarga de distribuir el flujo de salida (meladura clarificada) pero este constantemente se tapona debido al lodo que se almacena en el fondo y arrastra desechos a la meladura q se ha clarificado, dejándola sucia y con problemas para seguir el proceso, para ello es necesario continuamente realizar aseo del mismo para evitar acumulación de residuos que afectan la calidad final del producto.



Figura 14. Tubería principal para desalajo de meladura (serpentín)

Para eliminar el sólido remanente, la cachaza de la meladura también llamado “torta” es necesario usar unas paletas de limpieza, estas son curvas y planas, peor necesitan constantemente aseo para evitar que con el tiempo haya incrustaciones que impidan la remoción de este solido sobrenadante, dado a que es la finalidad de esta etapa del proceso.



Figura 15. Paletas de Remoción de cachaza.

Al ser clarificada la meladura desborda a una caja lateral, que es manejada por subniveles según el flujo y la cantidad de meladura que allá en el clarificador, para evitar el paso de la torta, la caja debe ser constantemente aseada ya que constantemente hay deposiciones de lodos, al igual que el tanque de meladura clarificada que es la etapa final de este proceso, y de allí será bombeada para ser concentrada.



Figura 16. Caja de desborde de meladura clarificada.

9.2 Variables importantes para la optimización de la clarificación de meladura:

Seleccionar adecuadamente las variables es por lo tanto un punto fundamental en el desarrollo del estudio.

La selección de las variables que representan un fenómeno depende principalmente de la experiencia y el conocimiento previo que se tiene del proceso. Cuando se seleccionan las variables deben listarse todas las que se consideran importantes, teniendo claridad que las variables como concentración de los reactivos de clarificación no se tuvieron en cuenta, ya que éstas se consideran constantes a lo largo del proceso.

9.2.1 Variable manipulable o variable de control:

En primera instancia se deben identificar las variables medibles y las manipulables, para ello es importante tener en cuenta las siguientes pautas:

- ✓ Como mínimo se deben medir las variables objetivo de control (a veces se recurre a variables auxiliares a partir de las que se infiere su valor)
- ✓ A veces se miden variables de perturbación y variables auxiliares para implementar estrategias avanzadas de control
- ✓ La elección de las variables manipulables es de vital importancia, ya que la calidad de control alcanzable depende en gran medida de su elección.

Para ello pueden ser usados aparatos electrónicos que proveen información, tal como²²:

Sensor que es un dispositivo que mide la variable a controlar, las de perturbación y variables de proceso secundarias a partir de las que se infiere el valor de otras no medibles o de medida costosa, se basan en la reproducción de un fenómeno físico cuya magnitud está relacionada con lo que se pretende medir.

Controlador Recibe la señal correspondiente a la variable medida y calcula la acción de control de acuerdo al algoritmo que tiene programado. La salida es una señal estándar que se envía al elemento final de control.

Actuador o elemento final de control

Manipula la variable de proceso de acuerdo a la acción calculada por el controlador, la señal de control le llega en forma analógica estándar, en un proceso químico la variable de proceso manipulada suele ser el flujo

²² http://www.disa.bi.ehu.es/spanish/asignaturas/15212/TEMA_1_Introduccion.pdf

de una corriente específica, por ello, el elemento final de control más utilizado es la válvula de control; Otras formas de manipular caudales: bombas, compresores y soplantes dotadas de motores de velocidad variable.

Son opciones para hacer de la calificación de meladura un proceso controlado que permita variaciones dentro del mismo, sin que se afecte gravemente el proceso de producción de azúcar en general.

Estas son las variables sobre las cuales se realizó una manipulación directa durante la experimentación, ya que el efecto de la variación de cada una de ellas puede medirse y estudiarse independientemente del resto de las variables. En esta sección de la fábrica se tiene las siguientes variables manipulables que permiten la clarificación:

1. Dosis de floculante:

La concentración de la solución dosificadora, es decir la que se aplica a la meladura debe ser de 0,05%, es decir diez veces más diluida que la solución de reserva que se encuentra en el tanque de maduración, si la solución dosificadora es más concentrada, su alta viscosidad puede afectar su buena dispersión en el material y los efectos beneficiosos del floculante se ven disminuidos.

Esta es una variable que se fue manipulando de acuerdo a la turbiedad de la meladura cruda y al flujo de jugo mezclado. Puesto que esta dosificación depende en gran medida de las condiciones locales y característica de la meladura.

Se tuvo en cuenta la siguiente ecuación para determinar la dosificación de floculante en un momento determinado y realizar de esta manera un control continuo.

$$\text{Rata de flujo de floculante} = (\text{m}^3/\text{h}) \quad \frac{\text{Flujo de Meladura Cruda} \times \text{ppm deseadas}}{\text{concentracion de floculante} \times 10000} \times \frac{1000}{60}$$

2. Tiempo de residencia (τ)²³:

El tiempo de residencia representa el tiempo de permanencia de una sustancia en la atmósfera, es decir, el tiempo que transcurre para que desaparezca totalmente por reacción o consumo de otro tipo.

La evolución en el diseño de reactores está relacionada con las reacciones (físicas, químicas y/o biológicas) que en ellos ocurre. Estas reacciones pueden ser cinéticas de transporte como se presentan en sedimentadores o cinéticas de reacción como ocurre en un reactor electroquímico de compartimentos separados.

Es necesaria la determinación de la Distribución de Tiempos de Residencia (DTR) para observar el comportamiento de la reacción que se lleva a cabo. En este tipo de equipos es normal encontrar regiones estancadas (zonas muertas), en donde hay poco o ningún intercambio de material con las regiones bien mezcladas, y por tanto no hay reacción ahí.

Es necesario describir características importantes tales como: Distribución de Tiempos de Residencia en el sistema, la calidad del mezclado y el modelo empleado para describir el sistema.

Para un fluido con propiedades determinadas, el tiempo de residencia es un parámetro que depende principalmente de la geometría del recipiente que contiene la sustancia o del flujo que atraviesa ese recipiente.

Los límites de la frontera de contención pueden ser lineales, superficiales o volumétricos. Las expresiones con las que más frecuentemente se describe este parámetro son:

$$\tau = \frac{L}{v} \quad \text{Y} \quad \tau = \frac{V}{Q}$$

El tiempo de residencia en la clarificación de meladura es importante ya que debe existir una correcta interacción entre los componentes del fluido y los reactivos químicos, que debe suministrarse en condiciones propicias en cuanto a propiedades físicas del material y medios de agitación cuando se requiera favorecer el contacto de las fases, considerando como la primera etapa la correcta mezcla y contacto de los reactivos de clarificación (fosfatos y sacarato) con la meladura de tal forma que posibilite la floculación primaria, siendo posible el buen contacto del floculante que

²³ [http://200.21.104.25/udecaldas/downloads/RevistaUC26\(1_2\)_2.pdf](http://200.21.104.25/udecaldas/downloads/RevistaUC26(1_2)_2.pdf) Revista Universidad de Caldas, Enero - Diciembre 2006 ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RESIDENCIA (DTR) PARA UN REACTOR ELECTROQUÍMICO DE COMPARTIMENTOS SEPARADOS *Henry Reyes Pineda*

induce la floculación secundaria. La segunda etapa es la formación de los flóculos secundarios en la etapa final de clarificación.

Existe un límite para el cual el excesivo tiempo de residencia desfavorece la operación debido a que los flóculos que permanecen durante mucho tiempo en el sistema pierden contacto con el aire que circunda el medio incrementando así su densidad y tendiendo a sedimentar o permanecer en suspensión, lo que no favorece el proceso ya que no se cuenta con una etapa previa de filtración que evite llevar estos flóculos en suspensión a los evaporadores para continuar su recorrido dentro del proceso.

El tiempo de retención de la meladura en el clarificador a alta temperatura tiene un gran efecto sobre el jugo sus componentes. Si el tiempo de retención es muy corto, la clarificación no va ser completa, produciéndose un material de trabajo sucio no apto para la fabricación de azúcar. Si el tiempo de retención es muy alto se producirá pérdida de azúcar por inversión, formación de color no deseado afectando drásticamente el brillo de la meladura.

En este estudio la medición y manipulación del tiempo de residencia se realiza a través del control del flujo volumétrico. El flujo volumétrico puede ser adaptado dependiendo de las circunstancias en las que se encuentre el proceso.

3. Temperatura:

La temperatura está relacionada directamente con la parte de la energía interna conocida como "*energía sensible*", que es la energía asociada a los movimientos de las partículas del sistema, sea en un sentido traslacional, rotacional, o en forma de vibraciones. A medida que es mayor la energía sensible de un sistema se observa que está más "caliente" es decir, que su temperatura es mayor.

En el caso de un sólido, los movimientos en cuestión resultan ser las vibraciones de las partículas en sus sitios dentro del sólido.

Dicho lo anterior, se puede definir la temperatura como la cuantificación de la actividad molecular de la materia.

Multitud de propiedades fisicoquímicas de los materiales o las sustancias varían en función de la temperatura a la que se encuentren, como su volumen, la solubilidad, la presión de vapor, su color o la conductividad

eléctrica. Así mismo es uno de los factores que influyen en la velocidad a la que tienen lugar las reacciones químicas.

La importancia de esta variable también tiene relación directa con la floculación primaria, debido a que la solubilidad de las sales de fosfato disminuye con el aumento de la temperatura, lo que hace favorable trabajar la etapa de clarificación a temperaturas altas. Estas ventajas se contrastan con el hecho de que a temperaturas elevadas puede ocurrir degradación de los azúcares a caramelos (furfurales) y una vez formados no se puede revertir este proceso. También se puede originar la formación de color, ya que en medio alcalino los azúcares reductores se descomponen a altas temperaturas, aumentando así el color y por último también se puede originar un aumento en la producción de mieles, ocasionada por la inversión de la sacarosa y la destrucción de azúcares invertidos.

La temperatura ideal para la clarificación de meladura se encuentra entre los 80 °C a 85°C, esta temperatura proviene del proceso anterior de evaporación, por ellos no es necesario usar ningún tipo de calentamiento adicional, ya que a esta temperatura no hay inconvenientes para realizar el proceso, pero debe ser cuidadosa la manera en que se maneja esta variable ya que un descenso de temperatura generaría cambios principalmente de floculación, dado a que la formación de flóculos sería incompleta ya que la reacción de la cal con los fosfatos presentes depende de la temperatura a la que se somete la meladura alcalizada. Cuando la temperatura está por debajo del punto de ebullición la meladura clarificada estará parcialmente sedimentada y por lo tanto turbia. Lo recomendado es mantener esta variable de manipulación, como un valor constante, para proceder con la investigación.

4. Dosificación de ácido fosfórico:

La cantidad presente en la meladura de ácido fosfórico debe ser la suficiente para poder reaccionar de manera completa con el sacarato de calcio que se suministra en la alcalinización, para ello es de vital importancia tener en cuenta la cantidad de meladura (Flujo) que se piensa dosificar con la sustancia. Así que es realmente importante generar una tabla que relacione estas variables y esté al alcance de el operador para que se realicen los cambios de manera oportuna. Para el cálculo de la cantidad de ácido fosfórico a dosificar, se usará la siguiente fórmula:

$$\text{Flujo de } H_3PO_4 \text{ (mL/min)} = \frac{\text{Flujo de meladura cruda (m}^3\text{/h)} \times \text{ppm deseadas}}{\text{Concentracion de } H_3PO_4 \text{ ppm} \times 1000} \times \frac{1000}{60}$$

En el anexo B se encuentra de forma breve y específica la cantidad de ácido fosfórico en mL/min que se debe usar para diferentes caudales de meladura cruda m³/h.

5. Flujo de aire (RPM aireador).

El flujo del aire tiene muchas similitudes con el del agua. Puede ser laminar y turbulento. El flujo laminar adopta trayectorias de hilos paralelos a la superficie terrestre, en el flujo turbulento los hilos adoptan trayectorias turbulentas de carácter helicoidal. El aire se hace turbulento a partir de cierta velocidad crítica (1 metro/segundo).

La presencia de partículas en movimiento dentro del flujo perturba profundamente la velocidad del aire. Cuantas más partículas menor velocidad, ya que el aire es más denso. Pero para que existan partículas en suspensión es necesario que haya fragmentos del calibre adecuado para que exista una intervención significativa. La humedad del aire dificulta la presencia de partículas en el aire, ya que si están húmedas, por un lado pesan más, y por otro tienden a aglutinarse haciendo que el proceso de aireación en el plato de aireación se dificulte.

La clarificación por fosflotación estudiada requiere de pequeñas burbujas de aire que arrastren hacia la superficie los flóculos que han comenzado a formarse como producto de la reacción del ácido fosfórico y el sacarato de calcio, y la posterior unión del fosfato tricálcico con los sólidos insolubles en suspensión en la meladura.

El flujo de meladura entra por rebose desde el tanque de reacción de productos químicos, que en operación normal mantiene una cabeza estática de flujo constante. El sistema de aireación está compuesto de un tanque provisto de un eje hueco conectado a un plato dispersor de aire. La cabeza de líquido en el tanque es constante, esto causa una contrapresión sobre las boquillas del plato que se opone al vacío generado. Si la altura del líquido sobre el plato aireador aumenta, la presión en la boquilla también aumenta; por tanto, la caída de presión desde la entrada de aire hasta la boquilla disminuye.

9.2.2 Variable No manipulable:

Corresponde a las variables del proceso que si bien son de gran importancia, su manipulación directa no es posible, ya que un cambio en cualquiera de estos valores afecta simultáneamente a otras variables incluidas en el estudio, impidiendo realizar el análisis del efecto de cada una de ellas sobre la operación.

1. Densidad:

La densidad promedio de la meladura es de 1.29 g/mL, considerando como brix promedio ideal 50-55 °Brix es principalmente un indicativo de los grados brix del material. La dependencia funcional entre la densidad y el brix es estrictamente proporcional.

La densidad se considera una variable no manipulable directamente ya que depende de muchos factores que diariamente se presentan en la planta, requerimientos de vapor, recirculación en el clarificador, necesidad de producción de azúcar por demanda, entre otros. Estos factores hacen complicado el ajuste automático del brix.

Durante el proceso de clarificación no hay un cambio significativo de Brix ya que se trata de mantener una temperatura constante durante el proceso, y no hay factores externos q contribuyan a este cambio, lo cual es una condición q se debe mantener, ya que un material muy denso o de alto Brix no es un candidato ideal para someter a una clarificación por flotación, ya que el material es tan “pesado” que no permite la formación adecuada de flóculos, ni la flotación de los mismos, por lo tanto la clarificación es deficiente y quedan flóculos sobrenadantes, afectando notoriamente el resto del proceso para la fabricación de azúcar.

2. Viscosidad (μ)

En la clarificación, la viscosidad es una de las variables más determinantes para el éxito de la operación y al igual que el brix, su manipulación no es inmediata, pues cabe aclarar que tiene dependencia directa con el brix y la temperatura siendo inversamente proporcional a la primera y directamente proporcional a la segunda. Su manipulación en este caso presenta los mismos inconvenientes del brix.

Las razones por la cual esta propiedad es tan importante además de las obvias ventajas en términos de fenómenos de transporte y mecánica de fluidos, es que una meladura menos viscosa permiten una mejor clarificación ya que favorece la homogeneidad de la mezcla con los reactivos de clarificación y el aumento de la velocidad de flotación.

3. Tensión superficial (γ):

En física se denomina tensión superficial de un líquido a la cantidad de energía necesaria para disminuir su superficie por unidad de área. Esta definición implica que el líquido tiene una resistencia para aumentar su superficie. La tensión superficial (una manifestación de las fuerzas intermoleculares en los líquidos), junto a las fuerzas que se dan entre los líquidos y las superficies sólidas que entran en contacto con ellos, da lugar a la capilaridad. Algunas de las propiedades de la tensión superficial, son:

- La tensión superficial depende de la naturaleza de las dos fases puestas en contacto que, en general, será un líquido y un sólido. Así, la tensión superficial será igual por ejemplo para agua en contacto con su vapor, agua en contacto con un gas inerte o agua en contacto con un sólido, al cual podrá mojar o no debido a las diferencias entre las fuerzas cohesivas (dentro del líquido) y las adhesivas (líquido-superficie).
- La tensión superficial se puede interpretar como un fuerza por unidad de longitud (se mide en $\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$). Esto puede ilustrarse considerando un sistema bifásico confinado por un pistón móvil, en particular dos líquidos con distinta tensión superficial, como podría ser el agua y el hexano. En este caso el líquido con mayor tensión superficial (agua) tenderá a disminuir su superficie a costa de aumentar la del hexano, de menor tensión superficial, lo cual se traduce en una fuerza neta que mueve el pistón desde el hexano hacia el agua.
- El valor de γ depende de la magnitud de las fuerzas intermoleculares en el seno del líquido, en este caso la meladura cruda. De esta forma, cuanto mayor sean las fuerzas de cohesión del líquido, mayor será su tensión superficial. Podemos ilustrar este ejemplo considerando tres líquidos: hexano, agua y mercurio. En el caso del hexano, las fuerzas intermoleculares son de tipo fuerzas de Van der Waals. El agua, aparte de la de Van der Waals tiene interacciones de puente de hidrógeno, de mayor intensidad, y el mercurio está sometido al enlace metálico, la más intensa de las tres. Así, la tensión superficial de cada líquido crece del hexano al mercurio.

- Para un líquido dado, el valor de la tensión superficial disminuye con la temperatura, debido al aumento de la agitación térmica, lo que redundaría en una menor intensidad efectiva de las fuerzas intermoleculares. El valor de la tensión superficial tiende a cero conforme la temperatura se aproxima a la temperatura crítica T_c del compuesto. En este punto, el líquido es indistinguible del vapor, formándose una fase continua donde no existe una superficie definida entre ambos.

En un fluido cada molécula interactúa con las que le rodean. El radio de acción de las fuerzas moleculares es relativamente pequeño, abarca a las moléculas vecinas más cercanas. Las fuerzas de interacción sobre una molécula que se encuentra a diferentes profundidades en un líquido desconocido, pictóricamente se demostrara así:

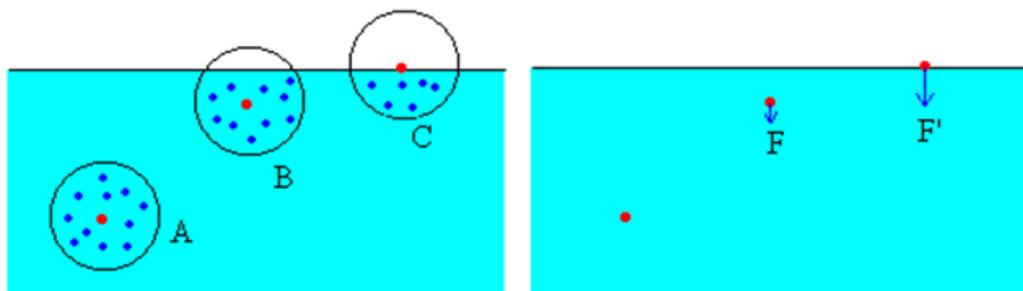
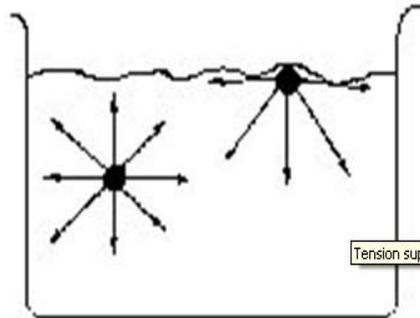


Figura 17. Bosquejo representativo de la Tensión superficial para una molécula a diferentes profundidades.

- A, el interior del líquido
- B, en las proximidades de la superficie
- C, en la superficie

Considerando una molécula (en color rojo) en el seno de un líquido en equilibrio, alejada de la superficie libre tal como la A. Por simetría, la resultante de todas las fuerzas atractivas procedentes de las moléculas (en color azul oscuro) que la rodean, será nula.



En cambio, si la molécula se encuentra en B, por existir en valor medio menos moléculas arriba que abajo, la molécula en cuestión estará sometida a una fuerza resultante dirigida hacia el interior del líquido.

Si la molécula se encuentra en C, la resultante de las fuerzas de interacción es mayor que en el caso B.

Las fuerzas de interacción, hacen que las moléculas situadas en las proximidades de la superficie libre de un fluido experimenten una fuerza dirigida hacia el interior del líquido. Como todo sistema mecánico tiende a adoptar espontáneamente el estado de más baja energía potencial, se comprende que los líquidos tengan tendencia a presentar al exterior la superficie más pequeña posible.

Debido a estas fuerzas, la superficie tiende a contraerse y ocupar el área más pequeña posible. Si se trata de una gota libre, tiende a tomar la forma esférica.

En toda operación unitaria en la cual se presente interacción entre líquidos y gases, es de gran importancia considerar los efectos de la tensión superficial. Para el caso de la clarificación por flotación bajo el principio de dispersión de aire, no es la excepción, aquí la tensión superficial juega un papel determinante en el comportamiento de la operación. La principal influencia de esta propiedad recae sobre el tamaño de la burbuja generada en el tanque de aireación, donde se conoce que los líquidos con menor tensión superficial facilitan el ingreso del aire y generan burbujas de tamaño más pequeño. Esto siempre es deseable en la clarificación ya que las burbujas más pequeñas aumentan la selectividad de la separación de los flóculos en la mezcla.

9.2.3 Variable de respuesta :

También llamadas variables dependientes se define como propiedad o característica que se trata de cambiar mediante la manipulación de la variable independiente, es decir las variables de control o variables manipulables.

La variable dependiente es el factor que es observado y medido para determinar el efecto de la variable independiente, se observan en el estudio y que podrían estar influenciadas por los valores de las variables independientes.

Esta variable es un indicativo del cumplimiento del objetivo de la operación que es remover sólidos insolubles remanentes del proceso, ya que es la última etapa de la que se dispone como limpieza del material que será próximamente procesado para la obtención de azúcar, por ello es de suma importancia la Clarificación de Meladura.

1. Turbiedad (Ti)

En este estudio, la turbiedad se convierte en la variable de respuesta como una medida del contenido de las impurezas dado que La turbiedad es la medida de la desviación de un haz de luz a través de una sustancia, ocasionada principalmente por los sólidos insolubles suspendidos en su interior. Estos sólidos insolubles son en su mayoría bagacillo, residuos de material vegetal, lodos y otras impurezas.

La turbiedad depende de la naturaleza del material, pero el mismo material puede diferir en la desviación de la luz, causada por diferente contenido de sólidos insolubles, por lo tanto, la característica predominante que determina la turbiedad son los sólidos insolubles.

El objetivo principal del proceso intermedio de clarificación de meladura es remover al máximo los sólidos insolubles remanentes que no se pudo retirar en las anteriores etapas de clarificación de jugos, o por las impurezas que se arrastran debido a incrustación de cal o contaminación por bagacillo u otros, durante el proceso hasta llegar a Clarificación de meladura, por esto se consideró que es de gran importancia monitorear la turbiedad antes del proceso y después de salir de esta etapa, para tener una medida de la fracción de remoción lograda para las diferentes condiciones de operación experimentadas, manteniendo así un control sobre el proceso, que permita mejorar la calidad del mismo.

Al proceso de clarificación normalmente se le hace el seguimiento de turbiedad (al inicio y al final de la etapa) en unidades NTU, esta es una medida relativa en donde se comparan dos muestras, siendo la primera la meladura sin clarificar o meladura cruda y la segunda la meladura clarificada, donde se observa claramente el cambio de brillo en la meladura, como evidencia de una buena clarificación, que es el objetivo de esta etapa.

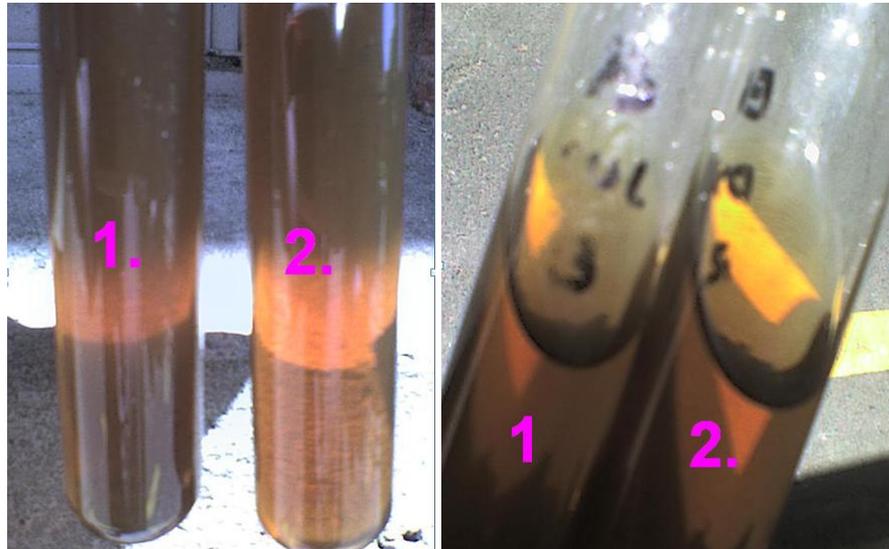


Figura 18. Comparación entre meladura cruda y meladura clarificada.

1. Meladura sin Clarificar: es un material más oscuro a comparación del que se muestra en el tubo de ensayo N°2.
2. Meladura Clarificada: Se puede notar más brillante y mas translúcida, lo cual es el objetivo principal en este proceso de clarificación.

La turbiedad se determina mediante un instrumento conocido como nefelómetro o turbidímetro, que se calibra frecuentemente, como mínimo 2 veces por semana, ya que este se usa constantemente para determinar Turbiedades tanto de jugo encalado, diluido, de primera extracción, miel, licor, meladura, agua, entre otros, siendo este instrumento realmente importante para el control de calidad de producto en proceso.



Figura 19. Turbidímetro HACH 2100N

3. Contenido de de fosfatos:

El contenido inicial de fosfatos refleja en primera instancia la remoción de fosfatos q se logra en la etapa previa de clarificación de jugo donde se elimina una cantidad significativa de los fosfatos originales de la caña, que al formar fosfato tricalcico con el sacarato forman flóculos primarios, y al encontrarse en solución con el Floculante (0.05%) agrupa estos flóculos secundarios para formar finalmente flóculos secundarios que sedimentaran por su peso significativo, eliminando así las impurezas del jugo en su mayoría el contenido de fosfatos en el jugo de caña. Es así, como el contenido inicial de fosfatos en meladura, debe ser bajo para poder tener un control correcto cerca de la dosificación de la fuente de fosfatos que se usa en esta etapa para no sobredosificar generando un reactivo en exceso que quedara sin reaccionar de forma innecesaria.

10. CAPACIDAD DE PROCESO Y DE MAQUINAS.

Se dice que un proceso o una maquina es capaz cuando los productos que se obtienen a su salida cumplen con las especificaciones. Esta capacidad se puede medir para comprobar que el proceso funciona no solamente bajo control, sino de una forma eficiente reduciendo a la mínima expresión los productos no conformes.

Es posible que diseñemos un proceso estable que este bajo control, en el cual el límite de control superior sea mayor que el límite superior tolerable; en la práctica, si queremos que un proceso produzca en forma eficiente solemos fijar una tolerancia de fabricación.

La capacidad del proceso puede estimarse definiendo la forma de la distribución que sigue la variable en estudio y dando una medida del valor central (media) y de la dispersión (sigma).

La capacidad del proceso se refiere a su uniformidad, la variabilidad es una medida de la uniformidad. Existen dos formas de variabilidad, la variabilidad inherente, existente en un momento dado, también llamada variabilidad instantánea y la variabilidad a lo largo del tiempo.

Para analizar el comportamiento del proceso, se toman muestras de producto fabricado y se realizan ensayos para determinar el valor de una característica de calidad seleccionada previamente. Desde el punto de vista del control estadístico, es conveniente incluir la etapa de muestreo y ensayo dentro del proceso mismo.

Cualquier modificación en las condiciones del proceso (modificación en el equipo, cambio de materias primas, etc.) conceptualmente debe considerarse como que se trata de otro proceso, diferente del anterior.

El primer paso para aplicar una técnica estadística es definir la característica de calidad que se va a medir el producto fabricado, desde el punto de vista estadístico, esta característica de calidad constituye una variable aleatoria, porque aun después de realizar una serie de mediciones, el valor que se obtendría en la siguiente medición no puede predecirse por calculo. El conjunto de todos los resultados de mediciones que pueden obtenerse es nuestro universo o población. Cualquier subconjunto de mediciones extraído del universo o población constituye una muestra.

Con respecto al concepto de universo o población, cuando se aplica a resultados de mediciones e un proceso, es necesario puntualizar lo siguiente:

La población o universo de resultados es el conjunto de datos que se obtuvieron hasta ese momento más aquellos que se obtendrían si el proceso continuara funcionando siempre bajo las mismas condiciones.

Esto se conoce como universo hipotético de mediciones de la característica de calidad.

Antes de aplicar cualquier técnica estadística, es necesario establecer algunas hipótesis bajo las cuales se va a desarrollar el análisis.

En primer lugar, se debe suponer que la característica de calidad (variable aleatoria) es continua y de distribución normal.

En segundo lugar, consideramos que el proceso está bajo control estadístico, es decir que la variabilidad se debe solamente a un sistema constante de causas aleatorias (no intervienen causas asignables)

Al realizar una sucesión de mediciones de la característica de calidad sobre muestras del producto fabricado, encontramos que los valores fluctúan alrededor de un valor central. Esto es lo que llamamos la fluctuación natural y esperable del proceso.

Esta variación de la característica de calidad medida se debe a un conjunto muy grande de causas que afectan al proceso, cuyo efecto individual es pequeño y que actúan en forma aleatoria (sistema constante de causas aleatorias).

La fluctuación natural del proceso es inherente al mismo y no puede eliminarse, sólo puede reducirse realizando modificaciones al proceso mismo, por tanto la fluctuación natural de un proceso puede cuantificarse a través de la desviación estándar del mismo, con la cual podemos calcular Límites de Tolerancia Natural del proceso.

Se debe aclarar en que estos límites no pueden fijarse voluntariamente, dependen del proceso y de las variables no controlables del mismo, las cuales se mencionaron anteriormente.

Generalmente se toma un rango para la fluctuación natural de 6 sigmas.

Los Límites de Especificación de un producto son fijados intencionalmente, por el fabricante o por alguna norma.

Estos límites constituyen un requisito a cumplir por el producto y no deben confundirse en ningún caso con los Límites de Control o con los Límites de Tolerancia Natural del proceso.

La Capacidad de un proceso es la aptitud para generar un producto que cumpla con determinadas especificaciones, en el mejor de los casos, es

conveniente que los Límites de Tolerancia Natural del proceso se encuentren dentro de los Límites de Especificación del producto. De esta manera nos aseguramos que toda la producción cumplirá con las especificaciones.

Como medida de la capacidad de un proceso es costumbre tomar un intervalo de 6σ u 8σ en la distribución de la característica en estudio.

El análisis de capacidad del proceso es fundamental en un Programa Integral de Mejora de Calidad. Entre sus aplicaciones, podemos señalar:

1. Predecir cómo se comportará el proceso respecto de las especificaciones.
2. Ayudar en la selección o modificación de los parámetros del proceso.
3. Orientar en el establecimiento de la frecuencia de los muestreos para el control del proceso.
4. Especificar las tolerancias de nuevos equipos.
5. Reducir la variabilidad en el proceso de fabricación.

Índice de capacidad:

En la práctica se define como la relación entre los límites de tolerancia superior e inferior y 6σ :

$$C_p = \frac{LTS - LTI}{6\sigma}$$

Si este índice resulta menor que la unidad, es porque el denominador 6σ es mayor que el numerador, es decir que el proceso estará superando los límites de tolerancia y se estarán produciendo productos no conformes.

Proceso capaz: $C_p \geq 1,33 \rightarrow (LTS-LTI) < 6\sigma \rightarrow$ todos los valores se encuentran dentro de los límites se fijados en la tolerancia.

Proceso incapaz: $C_p \leq 1,33 \rightarrow$ Aplicar medidas correctoras con el fin de disminuir la desviación típica y ajustar el proceso a los límites tolerables.

Principalmente, son dos las técnicas utilizadas en el análisis de la capacidad de un proceso: Histogramas y Gráficos de Control.

10.1 ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DEL PROCESO USANDO GRÁFICOS DE CONTROL E HISTOGRAMAS.

Los histogramas y otros métodos de análisis tales como los gráficos de probabilidad indican como varía el proceso pero no muestran, necesariamente, la capacidad potencial del proceso ya que éste puede estar en situación de fuera de control o presentar pautas que si se eliminaran reducirían la variabilidad de la característica en estudio.

Para analizar la capacidad del proceso se puede utilizar un histograma de frecuencias. Si se dispusiera de todos los datos del universo para la característica de calidad medida y se hiciera un histograma este permitiría tener una idea exacta de la fluctuación natural del proceso. Como esto es imposible, es necesario tomar un cierto número de mediciones y efectuar con ellas un histograma de frecuencias²⁴.

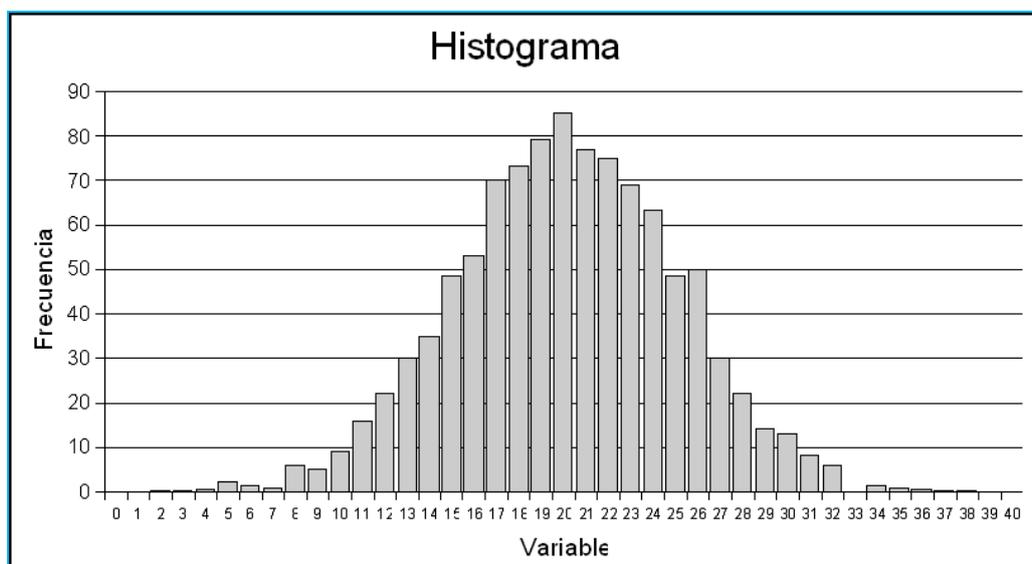


Figura 20. Histograma tipo de una población desconocida.

Este es el histograma de una muestra y por lo tanto es sólo una estimación del verdadero histograma del universo o población. Si representamos en las abscisas los Límites de Especificación del producto, podemos ver gráficamente si el proceso tiene aptitud (Capacidad) para fabricar dicho producto.

Para cuantificar la Capacidad de Proceso se utilizan coeficientes que permiten comparar el rango de especificaciones con la fluctuación natural del proceso.

²⁴ <http://www.slideshare.net/jcarreto/12-capacidad-de-proceso>

Uno de ellos es Cp.:

$$Cp = \frac{LSE - LIE}{6\sigma}$$

Donde:

LSE es el Límite Superior de Especificación

LIE es el Límite Inferior de Especificación

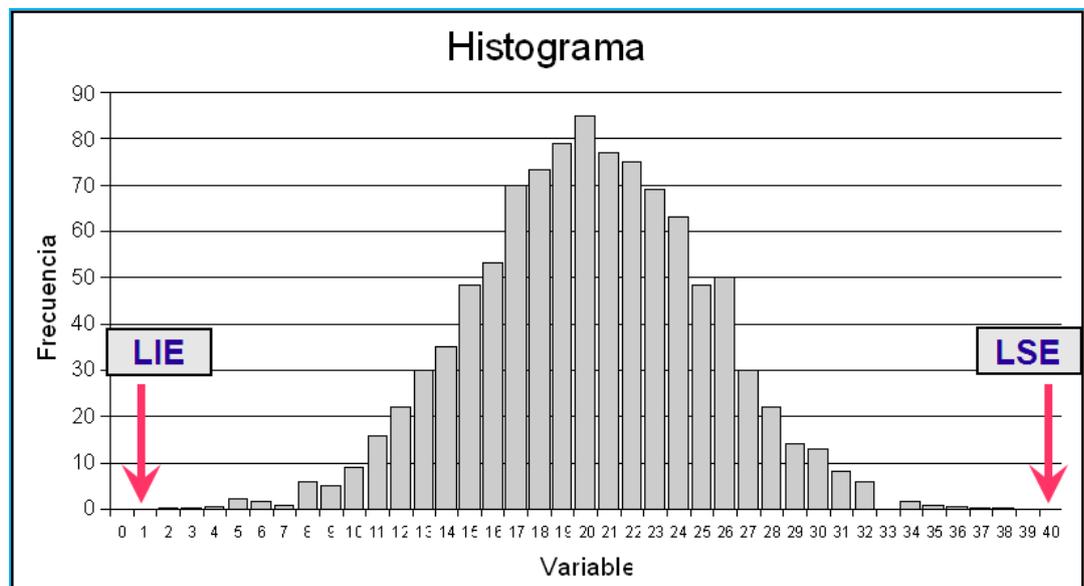


Figura 21. Histograma típico de una población.

Este coeficiente tiene el inconveniente de que para poder aplicarlo el centro de gravedad del rango de especificaciones debe coincidir con la tendencia central de las mediciones del proceso.

Cuando esto no ocurre se emplea el Cpk:

$$Cpk = \frac{\Delta}{3 * \sigma}$$

Donde:

$$\Delta = \text{Minimo entre } [LSE - \bar{X}] \text{ y } [\bar{X} - LIE]$$

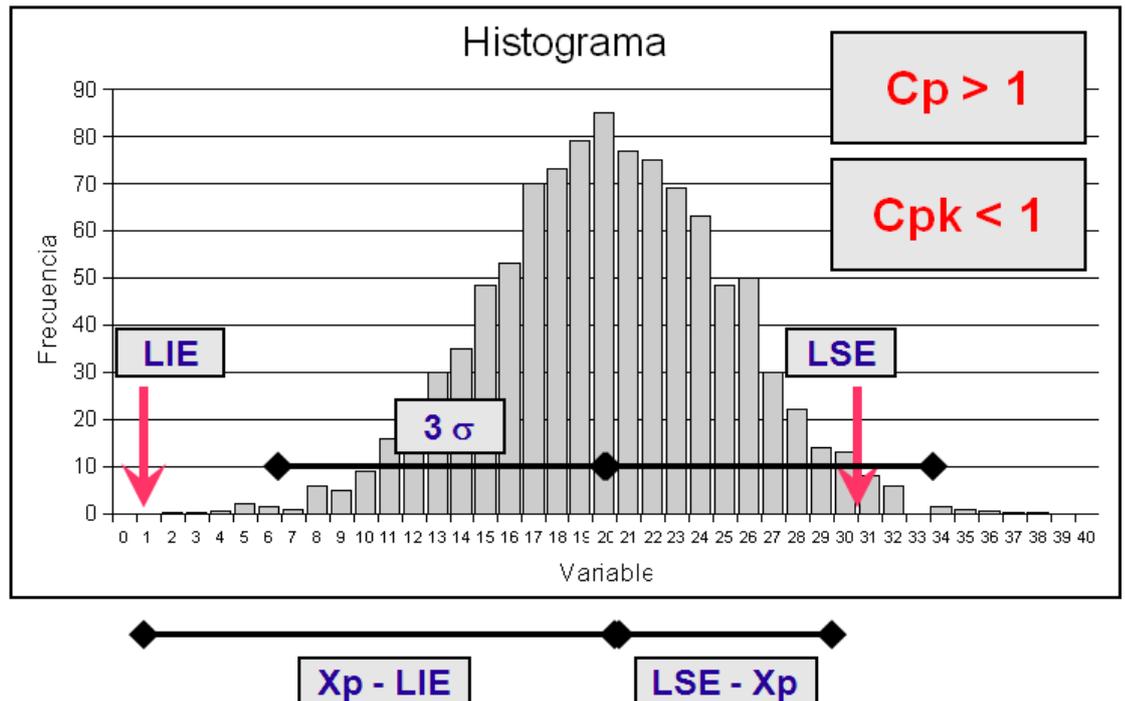


Figura 22. Descripción de capacidad de proceso en un histograma típico.

En el gráfico podemos observar que una buena parte del producto está por encima del Límite Superior de Especificación (LSE). Aún así resulta $C_p > 1$, indicando erróneamente que el proceso tiene capacidad suficiente. En este caso se debe usar el segundo coeficiente que muestra claramente que el proceso no tiene capacidad suficiente ($C_{pk} < 1$), tal como se puede observar en el gráfico.

El uso de un histograma para analizar la capacidad de un proceso tiene la ventaja de que se puede apreciar la forma de la distribución, con lo cual se puede confirmar o rechazar la hipótesis de que la misma es normal.

Pero el problema es que no se puede detectar la presencia de patrones no aleatorios, con lo cual no es posible confirmar o rechazar la hipótesis de que el proceso está bajo control estadístico.

Si el proceso no está bajo control estadístico los resultados del análisis de la capacidad de proceso no serán válidos y pueden llevar a conclusiones equivocadas.

Otra manera de analizar la capacidad de un proceso es por medio de los gráficos de control. La implementación de gráficos de control exige necesariamente colocar al proceso bajo control estadístico.

En consecuencia, se puede utilizar la desviación estándar utilizada para calcular los Límites de Control para calcular los coeficientes de capacidad de proceso Cp. o Cpk.

$$Cp = \frac{LTS - LTI}{6\sigma}$$

Como se expresó anteriormente, con los histogramas se pueden introducir errores en el momento de evaluar el proceso como capaz o incapaz, por ello para evitar esta situación lo más apropiado es usar gráficos de control son muy útiles en este sentido y deben ser considerados la técnica principal en los análisis de capacidad.

En los análisis de capacidad pueden usarse los gráficos de control por variables y los gráficos de control por atributos aunque son preferibles los primeros por la mayor información que suministran.

Cuando se utilizan gráficos \bar{x} -R, en el gráfico de \bar{x} se representan los promedios de subgrupos, es decir, promedios muestrales. No debe confundirse la desviación estándar del proceso con la desviación estándar de los promedios muestrales.

Si la desviación estándar del proceso es σ y cada subgrupo tiene m mediciones, la desviación estándar entre subgrupos es:

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{m}}$$

Si se utiliza por error la desviación estándar entre subgrupos para calcular los coeficientes de capacidad del proceso, se obtendrán valores más altos que los que corresponden a la verdadera capacidad del proceso.

11. PARTE EXPERIMENTAL

Tipo de muestra	Lugar de muestreo	Tipo de muestreo	Parámetro	Método	Referencia bibliográfica	Nº de análisis	Lugar de análisis.
Meladura Cruda.	Tanque De Reacción.	Puntual.	pH	Potenciométrico		40	Laboratorio de calidad y conformidad. Ingenio Risaralda, S.A.
		Puntual.	Turbiedad	Nefelométrico.	Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 20 th Edition	40	
		Puntual.	°Brix	Refractométrico	“Documentación interna Ingenio Risaralda”. Calidad Conformidad	40	
		Puntual.	Fosfatos	Espectrofotométrico.	Laboratory Manual For South African Sugar Factories	32	
		Puntual.	Sulfitos.	Yoduro-yodato.	“Documentación interna Ingenio Risaralda”. Calidad Conformidad	5	

Tipo de muestra	Lugar de muestreo	Tipo de muestreo	Parámetro	Método	Referencia bibliográfica	Nº de análisis	Lugar de análisis.
Meladura Clarificada	Caja De Desborde.	Puntual.	pH	Potenciométrico		40	Laboratorio de calidad y conformidad. Ingenio Risaralda S.A.
		Puntual.	Turbiedad	Nefelométrico.	Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 20 th Edition	40	
		Puntual.	°Brix	Refractométrico		40	
		Puntual.	Fosfatos	Espectrofotométrico.	Laboratory Manual For South African Sugar Factories	32	
		Puntual.	Sulfitos.	Yoduro-yodato.	“Documentación interna Ingenio Risaralda”. Calidad Conformidad	5	
		Puntual.	Sedimentos en fase húmeda.	Gravitacional-Centrifugación.	“Documentación interna Ingenio Risaralda”. Calidad Conformidad	50	

Tipo de muestra	Lugar de muestreo	Tipo de muestreo	Parámetro	Método	Referencia bibliográfica	Nº de análisis	Lugar de análisis.
Meladura Concentrada	Tubería meladura concentrada.	Puntual.	pH	Potenciométrico		40	Laboratorio de calidad y conformidad. Ingenio Risaralda, S.A
		Puntual.	Turbiedad	Nefelométrico.	Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 20 th Edition	40	
		Puntual.	°Brix	Refractométrico	“Documentación interna Ingenio Risaralda”. Calidad Conformidad	40	
		Puntual.	Sedimentos en fase húmeda.	Gravitacional-Centrifugación.	“Documentación interna Ingenio Risaralda”. Calidad Conformidad.	50	
		Puntual	Sacarosa y Pureza	Polarimétrico.	“Documentación interna Ingenio Risaralda”. Calidad Conformidad		
		Puntual	Azucares Reductores	Valoración.	“Documentación interna Ingenio Risaralda”. Calidad Conformidad		

12. ANALISIS DE LABORATORIO.

12.1 DETERMINACIÓN DE FOSFATOS EN MELADURA

Pesar 10 g de meladura, en un matraz aforado llevar a 200 mL con agua.

Filtrar con Cal (decalite), rechazando los primeros 10 ml del filtrado, y recolectar acerca de 30 mL para continuar el análisis.

Tomar 10 ml de la dilución en un matraz aforado de 50 ml.

Al matraz que contiene los 10 mL se debe diluir con 20mL más de agua destilada.

Adicionar 5 mL de Molibdato de amonio 1,5% y agitar.

Adicionar a este matraz 5 mL de solución reductora que es almacenada en condiciones ideales, aforar con agua destilada. Esperar 10min para leer la muestra en el espectrofotómetro a 700nm.

Preparar una muestra blanco, siguiendo el mismo procedimiento pero adicionando solamente molibdato de amonio.

Lee la absorbancia del blanco, en el espectrofotómetro a una longitud de onda de 700nm y celda de 1 cm empleando agua destilada como referencia.

Ajustar con el blanco el cero del espectrofotómetro para leer las muestras tratadas de meladura.

Leer de igual manera (700nm) la intensidad del color azul desarrollado en la muestra tratada, exactamente 10 minutos después de haber adicionado la solución reductora.

Registrar el valor de la absorbancia obtenido y realizar el cálculo posterior, con la siguiente fórmula, y con ayuda de la curva de calibración que se realiza previamente:

$$\text{ppm P}_2\text{O}_5 = (\text{mg P}_2\text{O}_5 \text{ muestra} - \text{mg P}_2\text{O}_5 \text{ blanco}) \times 2000 \text{ mg/Kg}$$

$$\text{ppm P}_2\text{O}_5 \times 1.3382 = \text{ppm PO}_4^{-3}$$

Este resultado debe ser tabulado para llevar un control de los fosfatos presentes en la meladura

12.2 DETERMINACIÓN DE GRADOS BRUX.

Para determinaciones realizadas a temperaturas diferentes de 20o C, se realiza la corrección respectiva.

Para determinar Grados Brix por el método Refractométrico, el refractómetro debe estar calibrado previamente.

La muestra se trata de igual manera para: Meladura, licores de refinería y miel virgen:

Enfría la muestra a temperatura ambiente

Pesa 150g de muestra y la disuelve completamente en 450 g de agua (Dilución 1:4)

12.3 DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS EN FASE HÚMEDA:

Pesar la cantidad necesaria de meladura, aproximadamente 100g y diluir con agua destilada en proporción 1:1

Agitar vigorosamente la solución anterior, pesar 50 g aproximadamente en cada uno de los tubos de centrifugación, previamente tarados.

Centrifugar las muestras 15-20 min a 3200 rpm

Decantar totalmente el líquido, dejando los tubos completamente secos con la ayuda de tirillas de papel filtro.

Pesar los tubos con el sedimento depositado y determinar el porcentaje de sólidos sedimentables así:

$$\% \text{ solidos sedimentables} = \frac{(\text{peso del tubo} + \text{residuo}) - \text{peso del tubo vacio}}{\text{peso muestra (dilucion)}} \times 200$$

12.4 DETERMINACIÓN DE TURBIEDAD Y PH:

Se toman 100ml de jugo clarificado, enfriándolo hasta que alcance una temperatura cercana a 20 °C.

Se lee la muestra en el turbidímetro (NTU) hasta que obtengamos una lectura estable.

Para el análisis del pH se tiene en cuenta lo siguiente:

Ajustar el pH metro con las soluciones de pH estándar a pH 4 y pH 7.

Enfriar la muestra a temperatura ambiente. Lavar los electrodos y el recipiente con una proporción de muestra a analizar. Llenar el beacker hasta cubrir el bulbo de los electrodos. Tomar la lectura, esperando hasta que se estabilice el pH metro en un valor constante. Lavar los electrodos con agua destilada y conservarlos en agua destilada.

12.5 DETERMINACIÓN DE SACAROSA Y PUREZA:

Los materiales utilizados deben estar completamente limpios y secos.

El tubo de polarizar debe ser calibrado a cero con agua destilada

Tomar 150 mL de la dilución preparada para la determinación de brix, en un envase con tapa

Adicionar 0.5g de cal necesaria para la clarificación del material

Tapa el envase lo agita vigorosamente y filtra.

Adiciona 1.5 g de sulfato de aluminio y 2 g de ayuda filtrante.

Agitar vigorosamente y filtrar.

Desechar los primeros 10 ml y recolectar aproximadamente 100ml del material filtrado claro

Calibrar a cero el polarímetro, utilizando agua destilada.

Purga el tubo de polarizar con aproximadamente 40 mL del material filtrado.

Adicionar el resto del material filtrante en el tubo para efectuar la lectura.

Registrar el valor obtenido.

12.6 DETERMINACIÓN DE AZUCARES REDUCTORES:

Preparación de la muestra:

Pesa 150 g de muestra y la disuelve completamente en 450 g de agua (Dilución 1:4)

Análisis:

Llena una bureta con 25 ml de la muestra.

Agrega a un erlemeyer de 250 ml, 5 ml de tartrato de Sodio y Potasio, 5 ml de Sulfato de Cobre; aproximadamente 50 ml de agua y un poco de parafina o aceite cristal.

Agrega desde la bureta la cantidad de muestra requerida dependiendo de la muestra a analizar (Jugos, Meladura, Miel Final) y de la calidad de la misma.

Calienta a ebullición y deja hervir durante 2 minutos exactamente, manteniendo la bureta 5 cm. por encima de la boca del erlenmeyer.

Agrega 5 gotas de azul de metileno. La solución debe quedar con coloración azul, si no es así se descarta la muestra y se agrega 1 ml menos de muestra al erlemeyer y se vuelve a comenzar con el procedimiento.

Continúa la titulación en caliente con agitación constante hasta que desaparezca el color azul.

Nota: La titulación debe terminar antes de 1 minuto desde que se agregó el azul de metileno y no se debe consumir más de 1 ml adicional de muestra para el cambio de color. Si esto ocurre se repite el análisis, usándose 1 ml menos de muestra en el momento de adicionar la cantidad inicial de muestra.

Los azúcares reductores se expresan en porcentaje en peso de la muestra:

Divide 4.68 entre los ml de muestra consumidos en la titulación.

Multiplica este valor por la dilución hecha a la muestra original

(En este caso por 4)

13. EQUIPOS Y REACTIVOS

13.1 EQUIPOS

- Espectrofotómetro GENESIS 10 UV THERMOSPECTRONIC
- Polarímetro
- Turbidímetro HACH 2100N
- Refractómetro
- Agitador magnético

13.2 REACTIVOS

- Molibdato De Amonio Tetrahidratado
- Acido Clorhídrico Concentrado
- Metabisulfito De Sodio
- Sulfito De Sodio Anhidro
- Acido -1- Amino - 2 Naftol – 4-Sulfónico
- Fosfato Ácido De Potasio
- Acido Sulfúrico Concentrado
- Cal Pulverizada
- Sulfato De Aluminio Tipo A
- Ayuda Filtrante
- Hidróxido De Sodio 0.1M
- Agua destilada
- Solución de glucosa al 0.5 %.
- Solución de fehling A (sulfato de cobre).

- Solución de fehling B (tartrato de sodio y potasio).
- Indicador azul de metileno 1 %.

13.3 MATERIAL DE VIDRIO

- Celdas de absorción
- Matraz aforado de 50 cm³, 200 cm³ y 100 cm³
- Erlenmeyer de 250 cm³ y 50 cm³
- Pipetas de 10 cm³, 20 cm³, 5 cm³
- Frascos de 100 cm³, 200 cm³.
- Embudo de 100 mm de diametro.
- Beaker de 250 cm³.
- Papel filtro Wathman No 91 o equivalente a 150mm de diámetro.
- Bureta de 25 cm³.
- Vidrio reloj.
- Balanza analítica.

14. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El objetivo principal de la investigación realizada en el departamento de elaboración de azúcar del Ingenio Risaralda, fue desarrollar un seguimiento a las variables fisicoquímicas obteniendo parámetros alrededor del material de estudio, la meladura, la cual se somete a un proceso de clarificación por flotación para eliminar las impurezas remanentes.

Para tal fin se realizó, a lo largo de cuatro meses, análisis de tipo fisicoquímico para determinar parámetros durante el proceso de clarificación, el cual es un proceso continuo que necesita establecer variables del control para un mejor rendimiento.

De esta manera se obtuvieron valores a lo largo del tiempo que demostraron las variaciones que se pueden presentar en los resultados, ya que el material, en este caso la meladura, no presenta características exactamente iguales diariamente. El proceso se ve afectado desde la calidad del suelo donde crece la caña, el clima de la zona donde esta crece, posteriormente el proceso de corte, levante y transporte de caña, lo cual se refleja en los parámetros del jugo de caña, tales como el rendimiento de sacarosa, acidez y contenido de sustancia coloreada, desde este instante se conocen las características iniciales que también tendrá la meladura.

Para realizar un correcto seguimiento de las características de la meladura, se pautaron las variables de control, variables de respuesta, las variables importantes e influyentes durante el proceso de clarificación de meladura; los análisis fueron realizados a muestras puntuales de meladura sometida al proceso de clarificación.

14.1 VARIACIÓN EN LA CONCENTRACIÓN DEL FLOCULANTE

Con este ensayo se pretende mostrar la influencia directa que tiene la concentración del floculante con la turbiedad, que es considerada como una variable de respuesta muy importante para conocer el desempeño del clarificador expresándolo como porcentaje de remoción.

El flujo de floculante a utilizar debe ser el siguiente:

$$(\text{m}^3/\text{hr}) = \frac{\text{Flujo meladura (m}^3/\text{hr)} \times \text{floculante requerido (ppm)}}{\text{Concentración de floculante (\%)} \times 10000}$$

Para asegurar una concentración de 0,05 se debe diluir con igual cantidad de agua caliente antes de que el floculante entre en contacto con la meladura, ya que en el tanque de preparación y maduración se tiene con una concentración de 0,1.

- Ensayo N° 1

Tiempo de residencia: 25 minutos.

Flujo de meladura: 68 m³/h

Flujo de floculante: 12 L/min

ppm de floculante: 10,58 ppm

	inicial	final	% remoción
Turbiedad (NTU)	136	53,4	60,73
Turbiedad (UI)	3139,54	2443,61	22,17
pH	5,79	5,98	
°Brix	60,38	50,98	

- Ensayo N° 2

Tiempo de residencia: 25 minutos.

Flujo de meladura: 67 m³/h

Flujo de floculante: 10,01 L/min

ppm de floculante: 9 ppm

	inicial	final	% remoción
Turbiedad (NTU)	101	37,9	62,48
Turbiedad (UI)	2113,5	1207,24	42,88
pH	6,03	6,38	
°Brix	50,77	48,21	

- Ensayo N° 3

Tiempo de residencia: 25 minutos.

Flujo de meladura: 67 m³/h

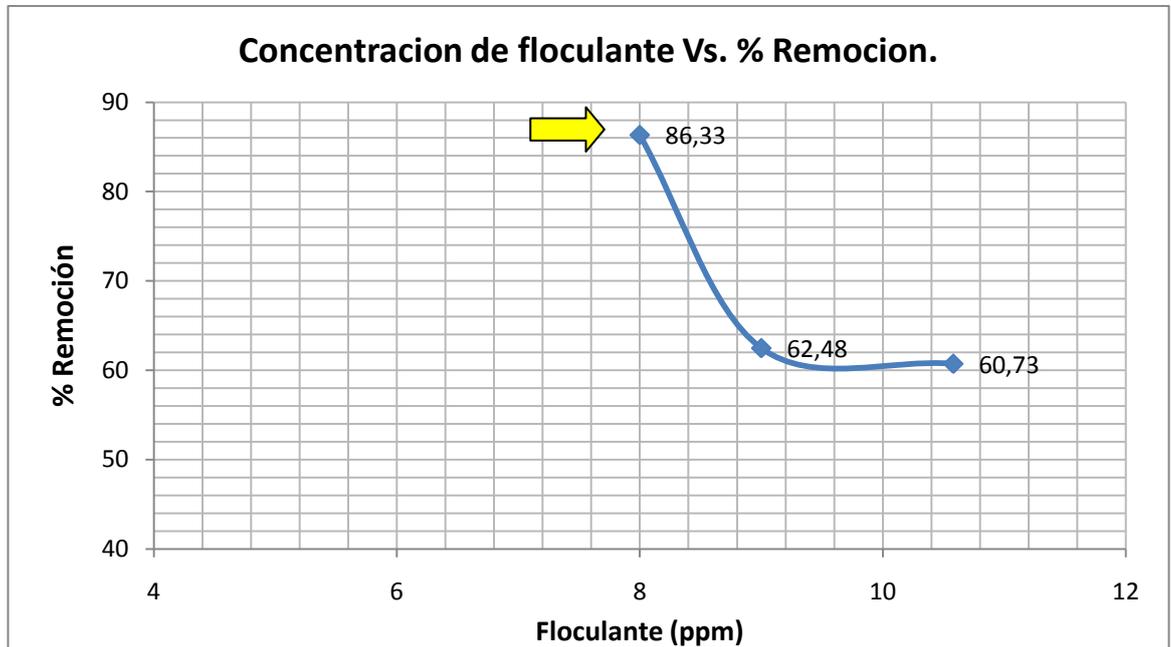
Flujo de floculante: 8,94 L/min

ppm de floculante: 8 ppm

	inicial	final	% remoción
Turbiedad (NTU)	259	35,4	86,33
Turbiedad (UI)	3791,204	1526,43	59,74
pH	7,5	7,04	
°Brix	43,68	45,53	

Como se puede observar, con los datos recolectados y representados mediante el siguiente grafico, se puede concluir que a un flujo de floculante de 8,94 L/min, manejando así mismo un flujo de 8,94 L/min para el agua caliente, para asegurar una concentración de 0.05% se obtiene así, el mayor porcentaje de remoción alcanzado.

Grafico 1. Concentración de floculante Vs. Porcentaje de remoción.



Para lograr este porcentaje de remoción superior a los demás, con un dato de 86,33%, es necesario tener en consideración las demás variables que tiene una relación directa con esta variable como lo es la concentración del floculante 8 ppm, el flujo de la meladura 67 m³/h, y el tiempo de residencia del material en el tanque de clarificación 25 minutos.

Para este ensayo se realizaron cambios en la dosificación de floculante, a diferentes concentraciones (ppm), siendo estos consecuentes con el flujo de meladura cruda manejada que entraba al clarificador. En la grafica N°1 es evidente que a menor concentración de floculante se obtiene un mayor porcentaje de remoción, lo cual se puede evaluar como un factor que indica que el sistema puede presentar sobresaturaciones de floculante, lo que no es conveniente debido a que se genera la formación de una "goma" en la cachaza o torta, lo que influye inmediatamente en la eficiencia del proceso de clarificación, dado que las paletas de remoción con las que cuenta el equipo no cumplen su función de barrido, aumentando la turbiedad final y por ende el porcentaje de remoción disminuirá.

El grafico 2, muestra la relación y comportamiento entre la turbiedad inicial y la turbiedad final, durante 34 muestreos puntuales para meladura cruda y meladura clarificada, los datos de este grafico se encuentran relacionados en la siguiente tabla 2:

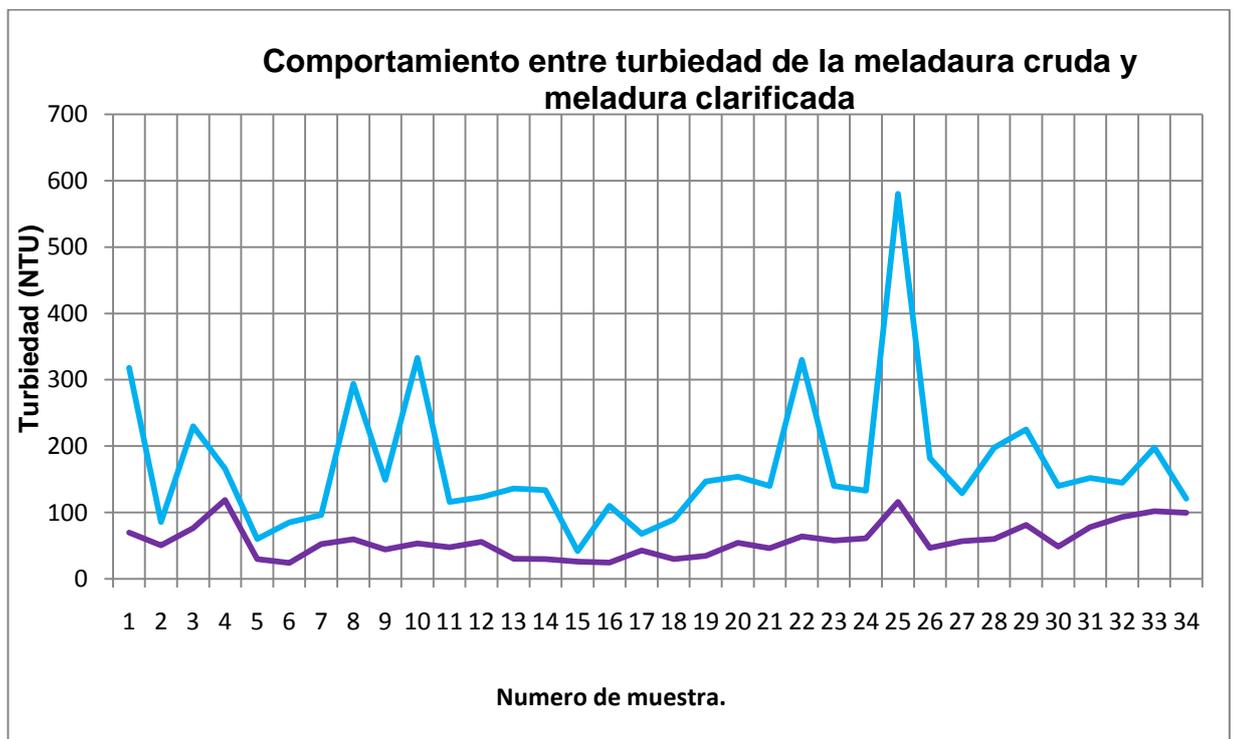
Tabla 2. Datos de turbiedad (NTU).

Numero de muestra	Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)
1	318	69,6
2	85,7	50,6
3	230	76,5
4	166	119
5	60,4	29,8
6	85,2	24,2
7	96,5	52,6
8	294	59,6
9	149	44,1
10	333	53,5
11	116	47,9
12	123	56
13	136	30,6
14	134	29,9
15	41,8	25,9
16	110	24,5
17	68	43,1
18	89,5	30,1
19	147	34,7
20	154	54,2
21	140	46,5
22	330	63,9
23	140	57,6
24	133	61,4
25	580	116
26	182	46,9
27	129	56,7
28	198	60,4
29	225	81,2
30	140	48,7
31	152	78,2
32	145	93,4
33	198	102
34	121	99,8

En la grafica 4 se muestra el comportamiento del porcentaje de remoción, en ella se puede observar como el 79.42% de los datos se encuentra por encima de la línea del mínimo requerido de control (50% de remoción) y solo el 20.58%

de los datos se encuentra por debajo de esta línea de referencia, mostrando así un comportamiento aceptable para el proceso, dado a que la mayor cantidad de datos se encuentra superior a la línea de control, pero lo ideal es que como mínimo un 90% de los datos se encuentren por encima de la misma, para tener certeza de que se está eliminando correctamente el contenido turbio inicial, con respecto a la turbiedad medida en la meladura clarificada.

Grafico 2. Comportamiento entre turbiedad inicial y final.



En la siguiente grafica, se ejemplificara el comportamiento para el porcentaje de remoción, tomando como mínimo requerido un 50% de turbiedad:

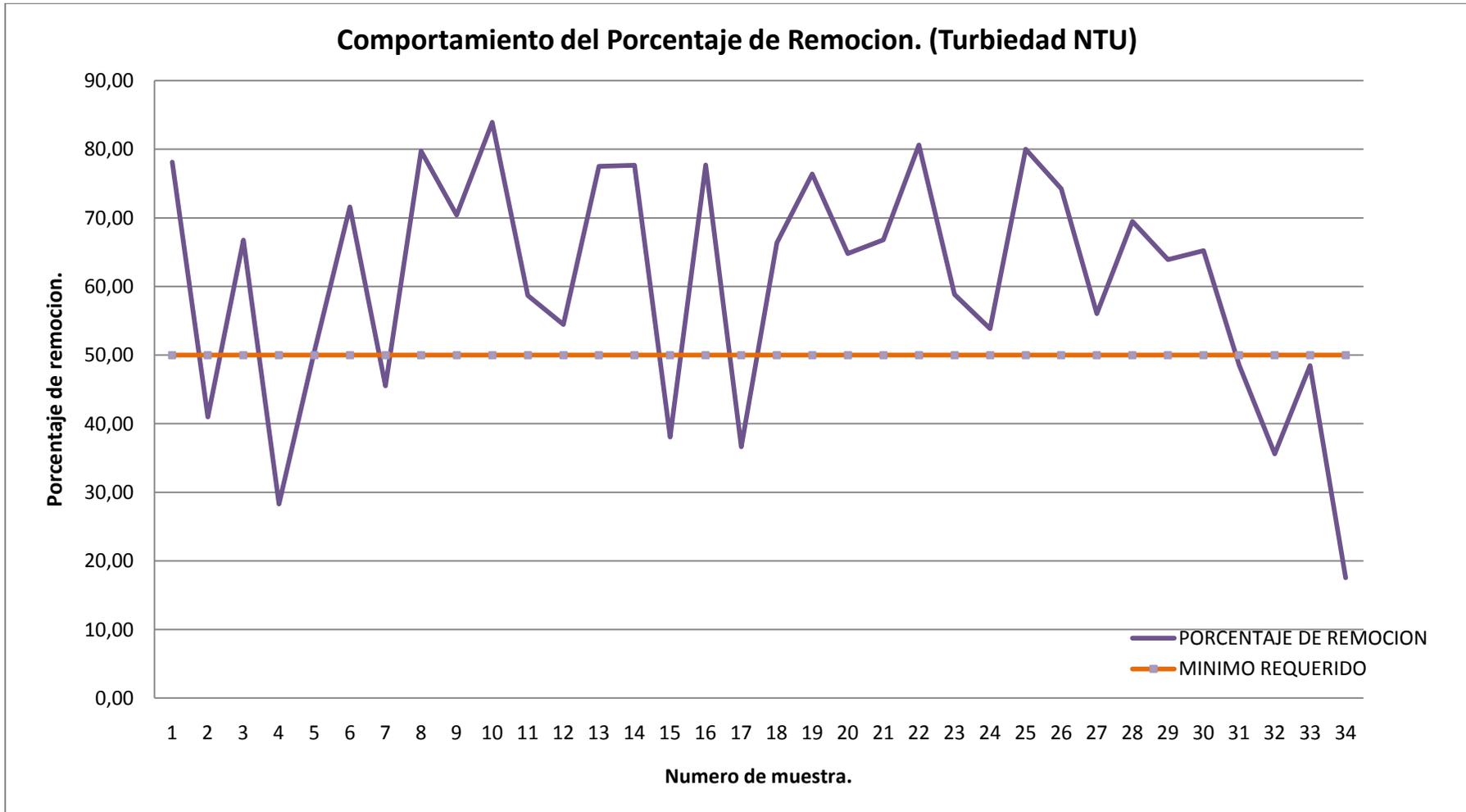


Grafico 3. Comportamiento del porcentaje de remoción

14.2 PORCENTAJE DE REMOCIÓN:

Se puede entender por remoción, como la acción de apartar, quitar, remover, o eliminar algo, en este caso son las impurezas de la meladura que se aglomeran formando cachaza o torta.

El porcentaje de remoción es muy importante en el proceso de clarificación, ya que puede considerarse como el principal indicativo de eficiencia, debido a que relaciona la turbiedad inicial (meladura cruda) y turbiedad final (meladura clarificada), mediante la eliminación de las impurezas y residuos en suspensión del líquido, tornándolo límpido y transparente, es así como se ve manifestado la calidad del proceso, en términos de porcentaje de remoción.

Este parámetro debe ser evaluado constantemente, para tener control sobre el proceso, para ello se debe determinar la variable de respuesta con una frecuencia determinada, se trata del valor de la turbiedad inicial, y la turbiedad final, que se genera como replica a la dosificación adecuada de floculante, sacarato de calcio y de la fuente de fosfatos (Maxiphos), por esto se debe tener bajo inspección la preparación, y dosificación de los mismos al proceso de clarificación.

Las cuantificaciones que se consideran influyentes, como los que se mencionaron anteriormente deben de poseer un registro de manejo, donde se especifique el flujo de dosificación, día y hora de preparación para el caso del floculante, fecha de arribo a la fábrica y cambio de caneca en el caso de Maxiphos, cantidad de insumos disponibles (barriles o bultos) para la subestación de clarificación de meladura; de esta forma se debe generar el control para el proceso, ya que los operadores no siempre se comunican este tipo de situaciones durante el cambio de turno, lo cual ocasiona conflictos posteriores y se ven reflejados en la eficiencia del proceso, y en el producto final.

En el gráfico 4 que relaciona la turbiedad inicial y final para la meladura, se puede ver claramente cómo se comporta la meladura en situaciones donde la turbiedad inicial es alta (>200 NTU), y la turbiedad final se reporta como un dato aceptable para la clarificación (≤ 50 NTU), es decir a mayor turbiedad inicial, menor turbiedad final, en la mayoría de los casos estudiados, (numero de muestra 1-3-8-9 del gráfico 4) esto se lograra si y solo si las variables manipulables como lo son, la dosificación de sacarato, tensoactivo, Maxiphos (fuente de H_3PO_4), y floculante, son manejadas correctamente según el flujo de meladura cruda que arriba al clarificador para ser tratada, ocasionando esencialmente una floculación ideal que es el objeto principal para culminar exitosamente el proceso, por lo tanto este tipo de gráfico de barras, es la manera más indicada para conocer y tener dominio del comportamiento del

proceso por la relación que se muestra entre la variable de respuesta, la turbiedad en los dos momentos principales del proceso, para ello se demostrara gráficamente los promedios que se obtuvieron durante mediciones periódicas al proceso, los datos puntuales se encuentran en la tabla 3.

Grafico 4. Comparación entre la turbiedad inicial y final en la meladura.

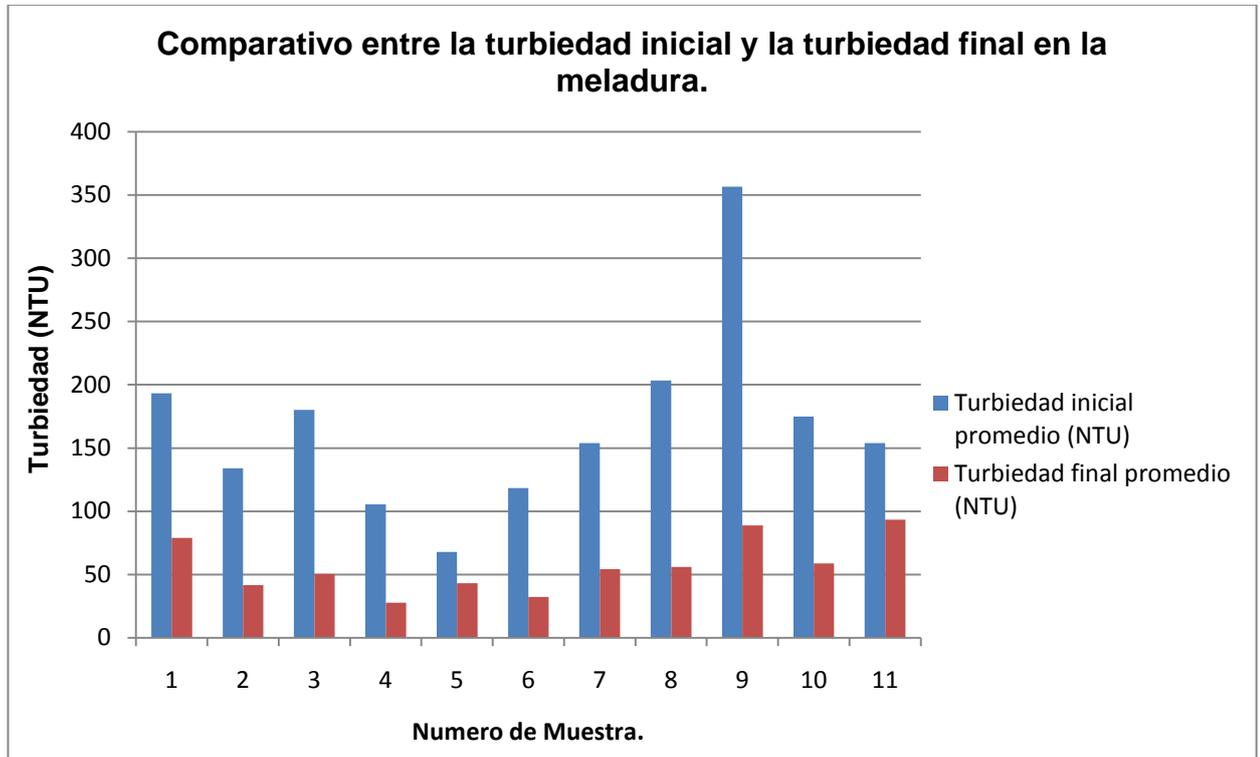
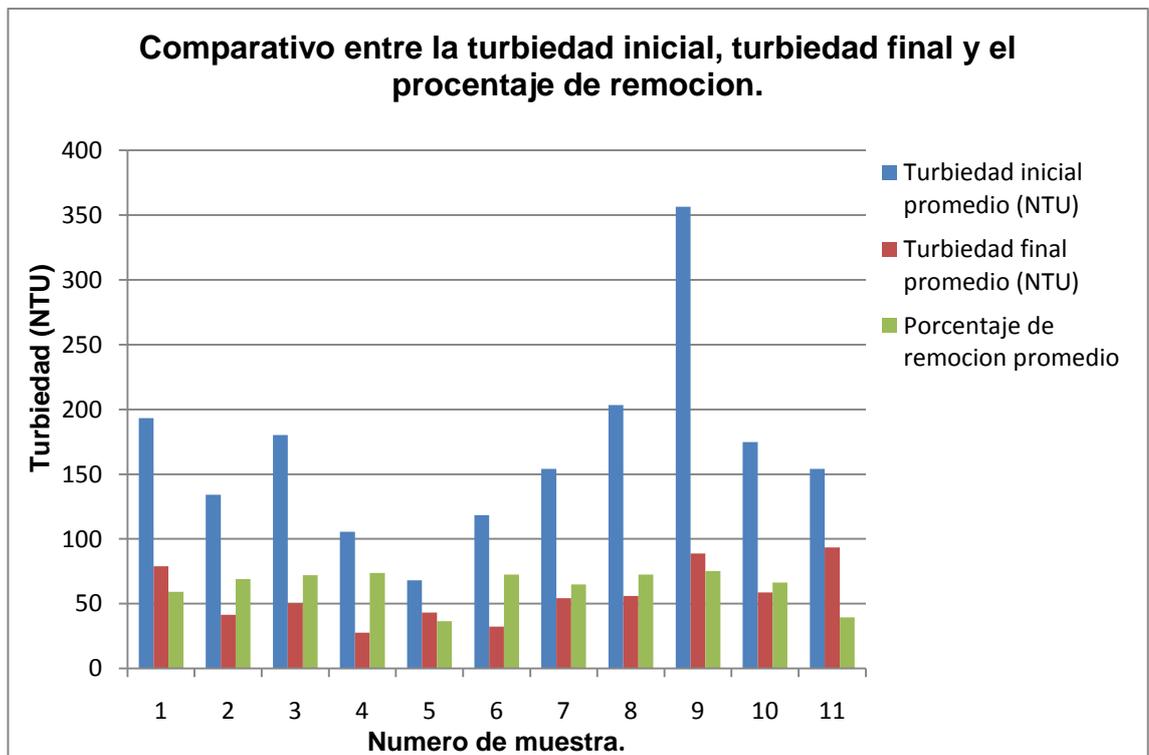


Tabla 3. Datos de turbiedad inicial y turbiedad final para la meladura.

Numero de muestra	Turbiedad inicial promedio (NTU)	Turbiedad final promedio (NTU)
1	193,175	78,925
2	134,025	41,55
3	180,25	50,375
4	105,45	27,725
5	68	43,1
6	118,25	32,4
7	154	54,2
8	203,3333	56
9	356,5	88,7
10	174,8	58,78
11	154	93,35

La situación anterior puede ser excluyente de algunos casos, como el que se muestra en el punto 4-5-11 del gráfico, donde la turbiedad de entrada es pequeña, y no se da una variación significativa en la turbiedad final, por ende el porcentaje de remoción no es favorable, lo cual nos indica que el proceso de clarificación sufre problemas para diversos tipos de meladura, que llegan al proceso presentando una baja turbiedad como consecuencia, sin embargo siempre ha de esperarse una remoción mayor al 50%, para afirmar que el proceso está cumpliendo acción de floculación (clarificación), lo que no ocurre en estos casos particulares.

Grafico 5. Comparativo entre la turbiedad inicial, la turbiedad final y el porcentaje de remoción para la meladura.



En el numero de muestra 5 y 11 se ejemplifican dos casos particulares, ya que para el punto 5 la turbiedad inicial y la turbiedad final no fueron datos alejados entre sí, lo que finalmente se desenlaza en un porcentaje de remoción bajo (36.62%), donde se deduce fácilmente que el proceso fue poco eficiente y que prácticamente la remoción en este momento fue casi nula. Como caso relacionado, en el punto número 11 se obtuvo un porcentaje de remoción bajo

(39.38 %), pero a diferencia del lo anteriormente mencionado, la turbiedad inicial es mayor en este, que la turbiedad inicial del punto 5, lo cual puede ser explicado como una principalmente como una consecuencia de la clarificación de jugo, dado a la calidad de la caña, tiempo de residencia en patios de la caña, entre otros, son factores que influyen directamente en la clarificación de jugo, y cuando esta no se realiza correctamente, las impurezas remanentes deben ser retiradas en la clarificación de meladura para obtener un producto final de excelente calidad.

Otros Factores que pueden generar estas altas turbiedades iniciales pueden ser los aseos a evaporadores, las incrustaciones de las tuberías, los altos flujos de meladura enviada al clarificador, y los paros de molienda durante un turno.

Tabla 4. Datos promedios de porcentaje de remoción.

Numero de muestra	Turbiedad inicial promedio (NTU)	Turbiedad final promedio (NTU)	Porcentaje de remoción promedio
1	193,175	78,925	59,143
2	134,025	41,55	68,998
3	180,25	50,375	72,053
4	105,45	27,725	73,708
5	68	43,1	36,618
6	118,25	32,4	72,600
7	154	54,2	64,805
8	203,3333	56	72,459
9	356,5	88,7	75,119
10	174,8	58,78	66,373
11	154	93,35	39,383
Desviación estándar.	74.53	21,81	13,56

En el caso particular del punto número 9 donde se señala un promedio de turbiedad inicial de 356.5, y una turbiedad final de 88, el muestreo fue realizado después de un paro de molienda por falta de caña durante dos horas y media, este tipo de contratiempos repercute directamente sobre el material en proceso, por ende en las determinaciones de turbiedad, en este tipo de situaciones donde se da un paro (independiente del motivo) es recomendable suspender paulatinamente la dosificación de insumos (químicos) dado a que la

meladura que se encuentra en el clarificador, o la que va a ingresar a este, se encuentra aún en proceso, los primeros 15 min solo se debe reducir el 25% de la dosificación, a la media hora el 50%, a la hora u hora y cuarto del paro se debe quitar en su totalidad la dosificación, claro está que esto también depende del descargue continuo de flujo de meladura que proviene de los evaporadores hacia el pulmón de meladura, por consiguiente al tanque de reacción.

Capacidad de proceso:

El mínimo requerido para un porcentaje de remoción, es un valor estimado de 50%, si se fija un valor de tolerancia de fabricación de $\pm 10\%$, dado el grafico de control del porcentaje de remoción del anexo C, el valor medio para estos porcentajes de remoción es de $\bar{x}=60.69\%$, se efectuara sobre esté en los límites de tolerancia inferior (LTI) y límite de tolerancia superior (LTS), para conocer si el proceso tiene una alta capacidad para producir productos de forma estable que se encuentren dentro de los limites de tolerancia.

- Valor de tolerancia: $\pm 10\%$ porque el proceso puede soportar dentro del mínimo requerido una variación del 10%
- Valor medio: $\bar{X}=60,69$ porque es el valor medio de los datos mostrado por el grafico de control, es decir que allí están estimados. todos los porcentajes de remoción de los 34 muestreos considerados.

En el Anexo D, Se encuentran tabulados todos los datos que se usaron para la determinación de esta capacidad de proceso, con su respectivo tratamiento estadístico.

Límite Superior de Tolerancia: $LTS= 60,69 +10 = 70,69\%$

Límite Inferior de Tolerancia: $LIT=60,69-10=50,69\%$

$\sigma= 16,95$

$$Cp = \frac{LTS - LTI}{6\sigma}$$

Fijando estos límites de tolerancia, se obtiene un Cp de valor:

$Cp.= 0,196 \leq 1,33$

Ahora, si se aumenta la tolerancia para el proceso se obtiene que:

Límite superior de Tolerancia: $LTS= 60,69 +20 = 80,69\%$

Límite inferior de tolerancia: $LIT=60,69-20=40,69\%$

$\sigma= 16,95$

$$Cp = \frac{LTS - LTI}{6\sigma}$$

El valor de Cp. obtenido será:

$Cp.= 0,393 \leq 1,33$

Para una tolerancia del 30%, se obtendrá un valor de $Cp. = 0,4916 \leq 1,33$

Al aumentar la tolerancia para el proceso, así mismo aumentara el índice de capacidad, pero esto no debe ser así, por que se está siendo permisivo con la mala calidad del producto o una mala operación del equipo.

Por ello, se decidió fijar como límite máximo de tolerancia el valor de un 20%, dado a que si se elije como límite de tolerancia 10% el proceso quedara muy sesgado y el intervalo de error es bajo, y en un proceso de mejora continua como lo es la clarificación de meladura, mientras se realizan los cambios pertinentes para mejorar el proceso la tolerancia debe ser mayor, pero sin sobrepasar un 30%.

14.3 GRADOS BRIX:

Los grados Brix (símbolo °Bx) miden el cociente total de sacarosa disuelta en un líquido. Una solución de 25 °Bx tiene 25 g de azúcar (sacarosa) por 100 g de líquido o, dicho de otro modo, hay 25 g de sacarosa y 75 g de agua en los 100 g de la solución.

Por esta razón, en la producción de azúcar es de suma importancia el control del brix durante el proceso de elaboración, dado a que en cada etapa de concentración en los evaporadores el valor de los grados brix debe ir aumentando, ya que este indica, como se menciono anteriormente, el cociente total de sacarosa disuelta en un líquido, por ello entre mayor sea este valor, mayor será el contenido de sacarosa, que es lo que se busca como objetivo principal, un producto final de buena calidad, azúcar de alto contenido en sacarosa.

La sacarosa o azúcar común es un disacárido formado por alfa-glucopiranososa y beta-fructofuranosa. El azúcar de mesa es el edulcorante más utilizado para endulzar los alimentos y suele ser sacarosa. En la naturaleza se encuentra en un 20% del peso en la caña de azúcar y en un 15% del peso de la remolacha azucarera, de la que se obtiene el azúcar de mesa. La miel también es un fluido que contiene gran cantidad de sacarosa parcialmente hidrolizada.

La sacarosa se usa en los alimentos por su poder endulzante. Al llegar al estómago sufre una hidrólisis ácida y una parte se desdobra en sus componentes glucosa y fructosa. El resto de sacarosa pasa al intestino delgado, donde la enzima sacarasa la convierte en glucosa y fructosa.

Para que la determinación de grados brix sea exitosa, se debe asegurar que el refractómetro se encuentre en un ambiente estable, conectado preferiblemente al tomacorriente con protección UPS y con un sistema que asegure una temperatura constante. La limpieza del prisma del refractómetro es indispensable para obtener una buena lectura. Por lo general, basta hacerla con un paño suave, limpio y humedecido con agua destilada. No usar ningún otro tipo de líquido para su limpieza.

Generalmente para la operación del aparato se deben seguir los siguientes pasos:

Encender el refractómetro; limpiar el prisma del refractómetro; agregar agua destilada y esperar que el instrumento arroje la lectura debiendo dar un

resultado de cero Brix, si no da ese resultado, volver a limpiar, hasta obtener el cero de calibración inicial.

Este procedimiento de regulación del equipo es aplicable a cada uno de los diversos materiales a analizar (jugos, meladuras, masas, magmas, azúcar, etc.), pero para materiales tan densos como lo son las masa, meladura, y magma, se debe procurar que la limpieza del prisma sea completamente, ya que de no ser así se introduce error a la medición por interferencia.²⁵

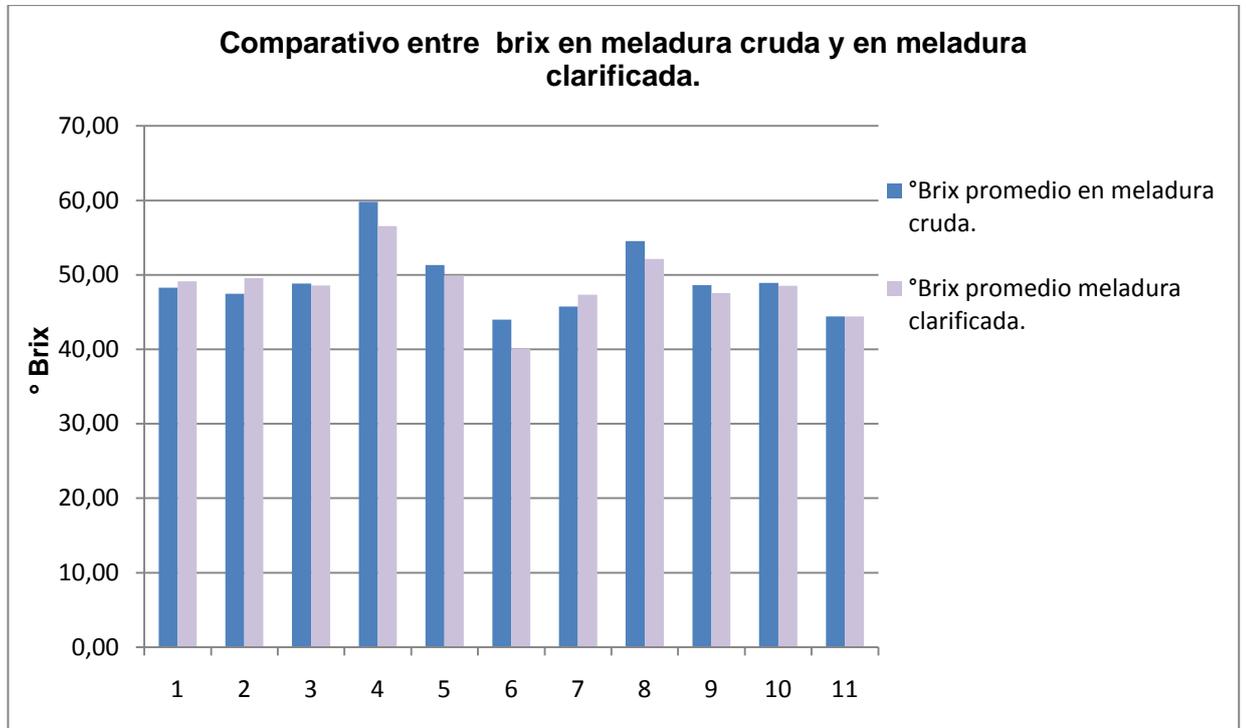
En el siguiente grafico 6 se expone el comportamiento y a la variación de los grados Brix respecto al tiempo, este muestreo se realizo de forma puntual, tomando la muestra de meladura cruda en el tanque de reacción, y la meladura clarificada en la caja de desborde continua al clarificador de meladura.

Tabla 5. Datos de valores diarios promedios para la determinación de grados brix en meladura cruda y meladura clarificada.

numero de muestra	°Brix promedio meladura cruda.	°Brix promedio meladura clarificada.
1	48,26	49,13
2	47,48	49,55
3	48,81	48,56
4	59,82	56,57
5	51,32	49,89
6	43,98	40,08
7	45,73	47,31
8	54,55	52,12
9	48,60	47,55
10	48,93	48,54
11	44,40	44,42
Desviación estándar	4.61	4.14

²⁵ http://www.emagister.com/uploads_courses/Comunidad_Emagister_57686_azucarero.pdf

Grafico 6. Grafico comparativo entre los promedios diarios de grados brix para la meladura cruda y para la meladura clarificada.



Como se puede observar en la tabla de datos 5 y en el grafico N° 6, el valor de la desviación estándar es realmente bajo, para tener un mejor criterio respecto a este valor, se puede definir La desviación estándar como una medida del grado de dispersión de los datos con respecto al valor promedio. Dicho de otra manera, la desviación estándar es simplemente el "promedio" o variación esperada con respecto a la media aritmética.

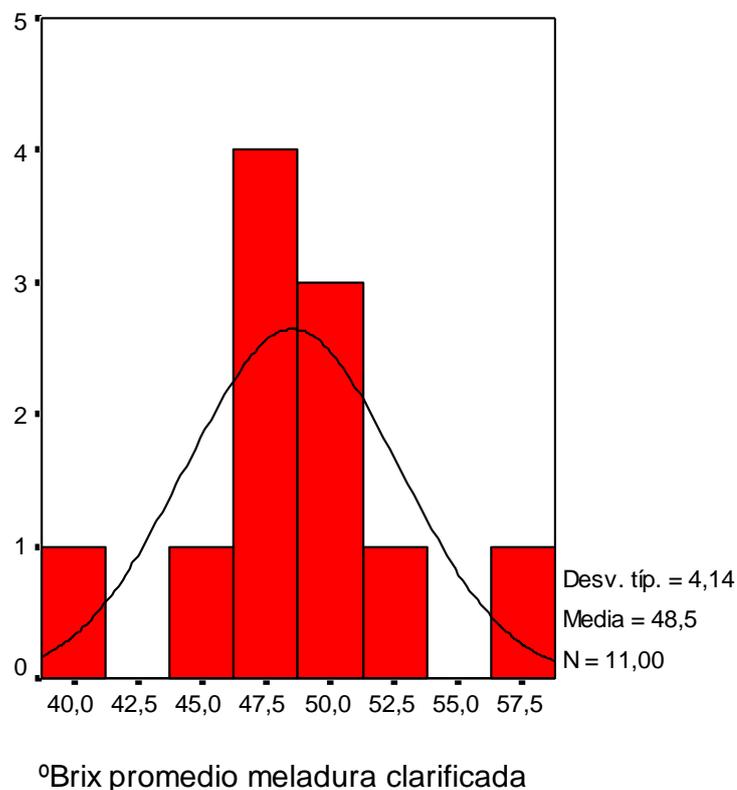
La desviación típica es una medida (cuadrática) que informa de la media de distancias que tienen los datos respecto de su media aritmética, expresada en las mismas unidades que la variable.

Para conocer con detalle un conjunto de datos, no basta con conocer las medidas de tendencia central, sino que necesitamos conocer también la desviación que representan los datos en su distribución respecto de la media aritmética de dicha distribución, con objeto de tener una visión de los mismos más acorde con la realidad a la hora de describirlos e interpretarlos para la toma de decisiones.

En la grafica 6 se puede observar el comportamiento de los grados brix, tanto para la meladura clarificada como para la meladura cruda, durante el proceso

no se somete el material a calentamiento, por tanto el cambio entre el valor del brix de la meladura sin clarificar y la meladura clarificada, no es muy significativo, pero el material que sale directo a evaporadores, la meladura clarificada, para ser concentrada debe de conservar un valor de brix promedio 48.52 ± 2 °Bx , que posteriormente será considerada como meladura concentrada con un valor promedio de brix de 60.49 ± 2 °Bx, por el momento solo se analizara mediante un histograma el comportamiento y la tendencia de los datos de la meladura clarificada, que es el objeto de estudio de interés en este caso:

Grafico 7. Histograma de frecuencia del brix promedio de meladura clarificada.



La desviación estándar que se muestra en la representación grafica del histograma, arroja un valor de desviación típica de 4.14, Esta medida nos permite determinar el promedio aritmético de fluctuación de los datos respecto a su punto central o media, es decir, es el promedio de las distancias de cada punto a la media, todos los datos que se obtuvieron están separados de la media (48.5) una distancia promedio de 4,14, es irrefutable que una desviación estándar cada vez más pequeña es lo ideal en un proceso, ya que esto

garantiza que el producto obtenido del mismo sean similares entre sí, evitando que exista una variación indeseable que perjudique el proceso como tal.

Al analizar la grafica se puede observar un intervalo alrededor de la media maestra (48,5), donde existe una alta frecuencia de los datos registrados, lo cual indica que gran proporción de las muestras tomadas están dentro del intervalo, es decir que esa gran proporción de muestras tienen entre 44,6 grados brix a 52,64 grados brix, y son pocos los datos que se encuentran fuera de este rango, es por ello que hay mayor probabilidad de que al realizar una toma de Grados Brix de meladura clarificada, el valor obtenido se encuentre dentro de esta categoría de datos.

Ahora bien, la meladura clarificada es conducida a un nuevo tándem de evaporación en serie, donde pasa a ser meladura concentrada que se encuentra en un promedio de 60.49 ± 2 °Bx, que subsiguientemente será empleada para los cocimientos en tachos donde posteriormente se genera el grano de azúcar, es por ello que la calidad de la meladura es tan importante.

A continuación se enseña un diagrama del quinto efecto de evaporación, el cual posee dos evaporadores en serie donde se realiza la concentración de la meladura.

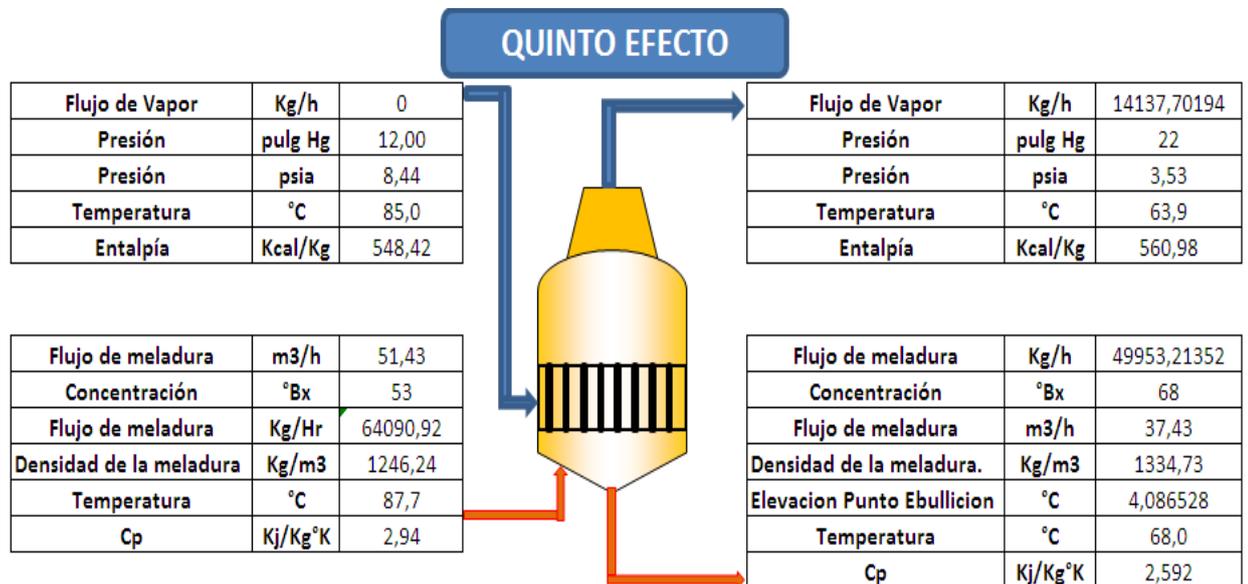


Figura 23. Quinto efecto de evaporación. Concentración de meladura.

La calandria de este intercambiador tiene una eficiencia de 89 %.

Ahora bien, como se nombra en el diagrama, la meladura concentrada resultante de esta etapa de evaporación, cuenta con las siguientes propiedades:

Temperatura de la meladura concentrada al salir del evaporador: 68°C

Concentración (°Brix): 68 °Brix

A modo de comparación entre la meladura cruda, meladura clarificada y la meladura concentrada, se espera que el comportamiento e incremento de los grados brix, sea como se muestra a continuación en un grafico típico de barras proporcionando una mejor visión para su interpretación.

Grafico 8. Relación entre los grados brix en al meladura.

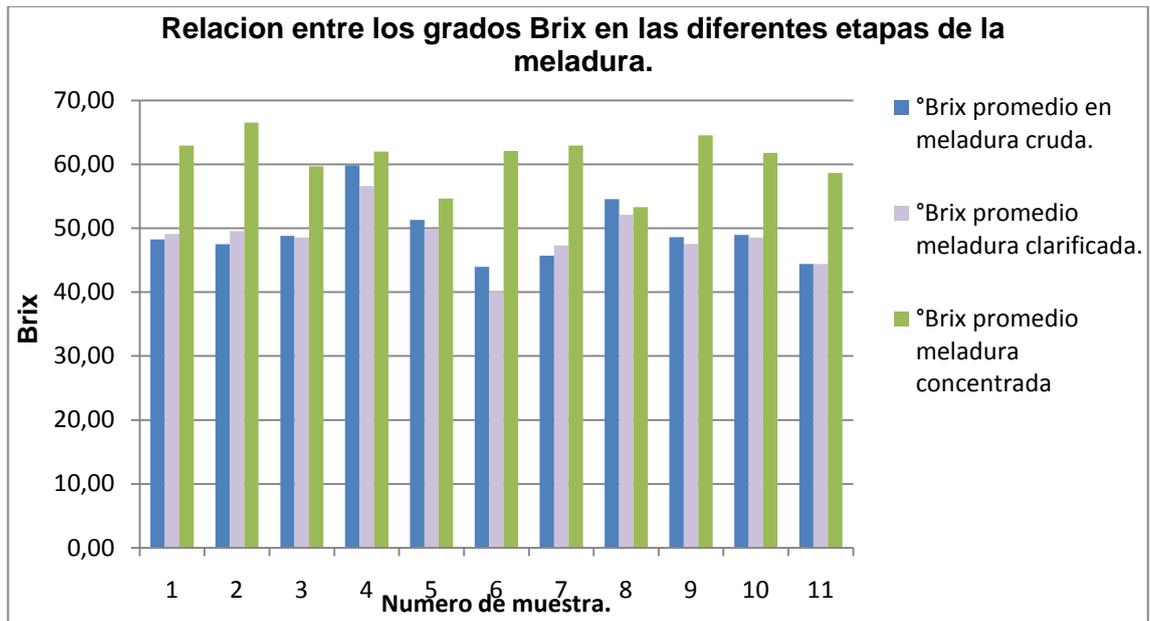


Tabla 6. Datos de grados brix para la meladura en sus tres etapas

Numero de muestra	°Brix promedio meladura cruda.	°Brix promedio meladura clarificada.	°Brix promedio meladura concentrada
1	48,26	49,13	62,95
2	47,48	49,55	66,56
3	48,81	48,56	59,70
4	59,82	56,57	61,99
5	51,32	49,89	54,67
6	43,98	40,08	62,08
7	45,73	47,31	62,91
8	54,55	52,12	53,31
9	48,60	47,55	64,54
10	48,93	48,54	61,80
11	44,40	44,42	58,63
Desviación estándar	4,61	4,14	4,00

Estadísticos descriptivos de los grados Brix para la meladura durante el proceso:

Tabla 7. Estadística descriptiva de los grados brix en la meladura.

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. Típ.	Varianza	C.V (%)
Brix meladura clarificada	33	38,05	64,15	47,8609	5,39836	29,142	11.28
Brix meladura cruda	33	42,79	69,11	49,0348	5,88693	34,656	12.01
Brix meladura concentrada	50	6,41	71,24	60,4846	9,40838	88,518	15.56
N válido	33						

Estos parámetros, llamados estadísticos descriptivos comprende gran parte de la estadística que se dedica a analizar y representar los datos. Este análisis es muy básico. Aunque hay tendencia a generalizar a toda la población, las primeras conclusiones obtenidas tras un análisis descriptivo, es un estudio calculando una serie de medidas de tendencia central, para ver en qué medida los datos se agrupan o dispersan en torno a un valor central.

En estadística el coeficiente de variación (de Pearson), es una medida de dispersión útil para comparar dispersiones a escalas distintas pues es una medida invariante ante cambios de escala. Uno de sus usos más comunes es para expresar la desviación estándar como porcentaje de la media aritmética, mostrando una mejor interpretación porcentual del grado de variabilidad que la desviación típica o estándar.

Por otro lado, el coeficiente de Pearson presenta problemas ya que a diferencia de la desviación típica este coeficiente es variable ante cambios de origen. Por ello es importante que todos los valores sean positivos y su media de por tanto un valor positivo.

A mayor valor de coeficiente de variación (C.V) mayor heterogeneidad de los valores de la variable; y a menor C.V., mayor homogeneidad en los valores de la variable.

Exigimos que: $\bar{x} > 0$

Se calcula: $C_V = \frac{\sigma}{\bar{x}}$

Donde σ es la desviación típica. Se puede dar en tanto por ciento calculando:

$$C_V = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100$$

De esta manera, se obtuvo en la meladura concentrada un coeficiente de variación (C.V) igual a 15.56%, este valor indica la dispersión de los datos con referencia a la media aritmética, dado a que C.V Depende de la desviación típica y en mayor medida de la media aritmética, ya que cuando esta es 0 o muy próxima a este valor C.V. pierde significado, también puede dar valores muy grandes, que no necesariamente implican un gran dispersión de datos.

Así, se puede citar que el C.V tiene como propiedades básicas las siguientes:

- El coeficiente de variación es típicamente menor que uno.
- Para su mejor interpretación se lo expresa como porcentaje.
- El coeficiente de variación es común en varios campos de la probabilidad aplicada, como Teoría de renovación, Teoría de colas y. En estos campos la distribución exponencial es a menudo más importante que la distribución normal. La desviación típica de una distribución exponencial es igual a su media, por lo que su coeficiente de variación es 1. Las distribuciones con un C.V. menor que uno, como la distribución de Erlang se consideran de "baja varianza", mientras que aquellas con un C.V. mayor que uno, como la distribución hiperexponencial se consideran de "alta varianza". Algunas fórmulas en estos campos se expresan usando el cuadrado del coeficiente de variación, abreviado como S.C.V.

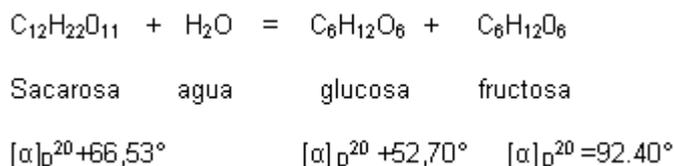
14.4 pH DE LA MELADURA:

El pH es una medida de la acidez o alcalinidad de una solución. El pH indica la concentración de iones hidronio $[H_3O^+]$ presentes en determinadas sustancias. El pH típicamente va de 0 a 14 en disolución acuosa, siendo ácidas las disoluciones con pH menores a 7 (el valor del exponente de la concentración es mayor, porque hay más protones en la disolución), y alcalinas las que tienen pH mayores a 7. El pH = 7 indica la neutralidad de la disolución (donde el disolvente es agua). En disoluciones no acuosas, o fuera de condiciones normales de presión y temperatura, un pH de 7 puede no ser el neutro. El pH al cual la disolución es neutra estará relacionado con la constante de disociación del disolvente en el que se trabaje.

La determinación del pH es uno de los procedimientos analíticos más importantes y más usados en ciencias tales como química, bioquímica y la química de suelos. El pH determina muchas características notables de la estructura y actividad de las biomacromoléculas y, por tanto, del comportamiento de células y organismos.

Durante el proceso de producción de azúcar, el valor del pH se debe regular frecuentemente, tratándolo de llevar a un valor cercano al neutro para evitar la inversión de la sacarosa que se da a pH ácidos. El jugo obtenido en la etapa de molienda es de carácter ácido (pH aproximado: 5,2), éste se trata con lechada de cal, la cual eleva el pH con el objetivo de minimizar las posibles pérdidas de sacarosa. La cal también ayuda a precipitar impurezas orgánicas o inorgánicas que vienen en el jugo y para aumentar o acelerar su poder coagulante, se eleva la temperatura del jugo encalado mediante un sistema de tubos calentadores.²⁶

La sacarosa se hidroliza con facilidad en soluciones ácidas a velocidades que aumentan notablemente según el aumento de la temperatura y la disminución del pH, con liberación de los monosacáridos constituyentes, según la reacción:



A esta reacción hidrolítica se aplica generalmente el nombre de inversión, ya que produce un cambio de la actividad óptica dextrógira propia de la sacarosa a una actividad neta levógira, equivalente a $[\alpha]_D^{20} - 39,70^\circ$, de los productos de la reacción.

La invertasa es un catalizador orgánico que acelera la reacción de inversión de la sacarosa, desdoblándola por su acción hidrolítica, en otras formas de

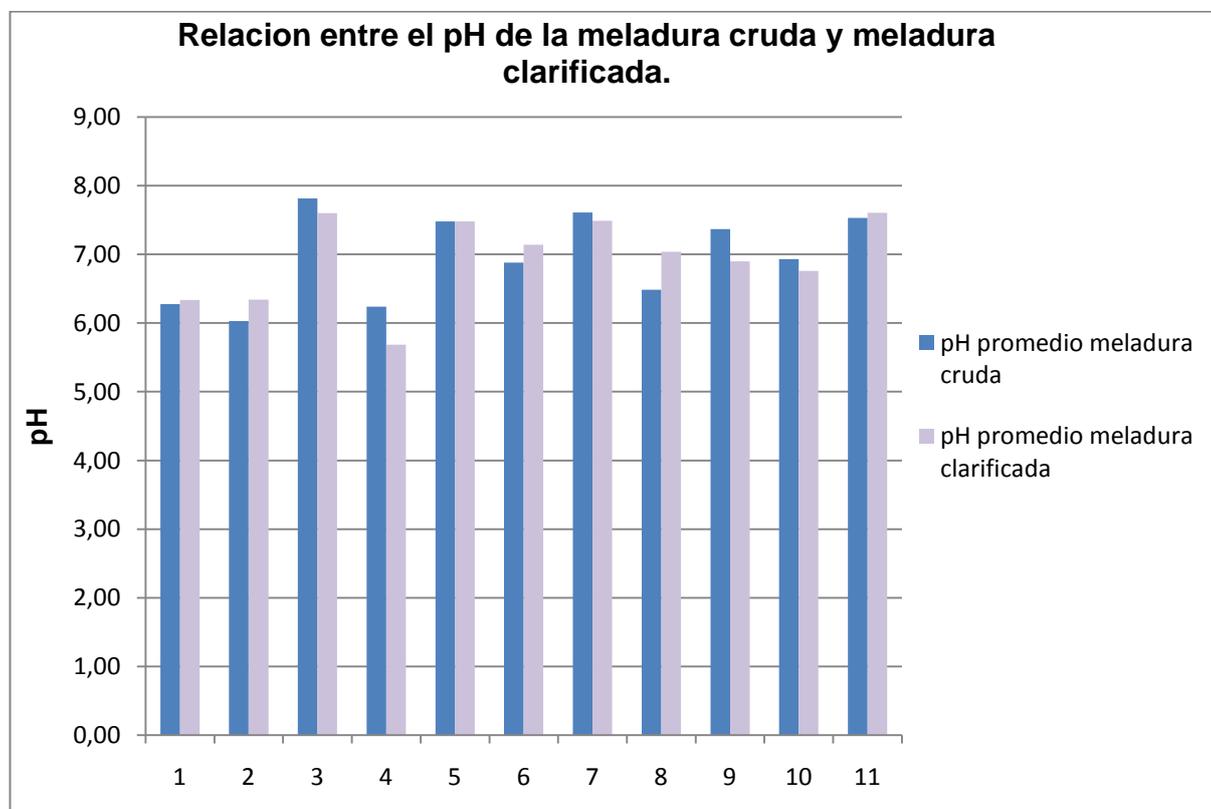
²⁶ http://www.inazucar.gov.do/obtension_azucar.htm

azúcares más simples, usados para la nutrición de los microorganismos, que de este modo encuentran medios favorables de crecimiento.

Tabla 8. Datos promedio de pH de meladura.

	pH promedio meladura cruda	pH promedio meladura clarificada
1	6,28	6,34
2	6,03	6,34
3	7,81	7,60
4	6,24	5,69
5	7,48	7,48
6	6,88	7,14
7	7,61	7,49
8	6,49	7,04
9	7,37	6,90
10	6,93	6,76
11	7,53	7,61

Grafico 9. Relación entre el pH de la meladura cruda y meladura clarificada.



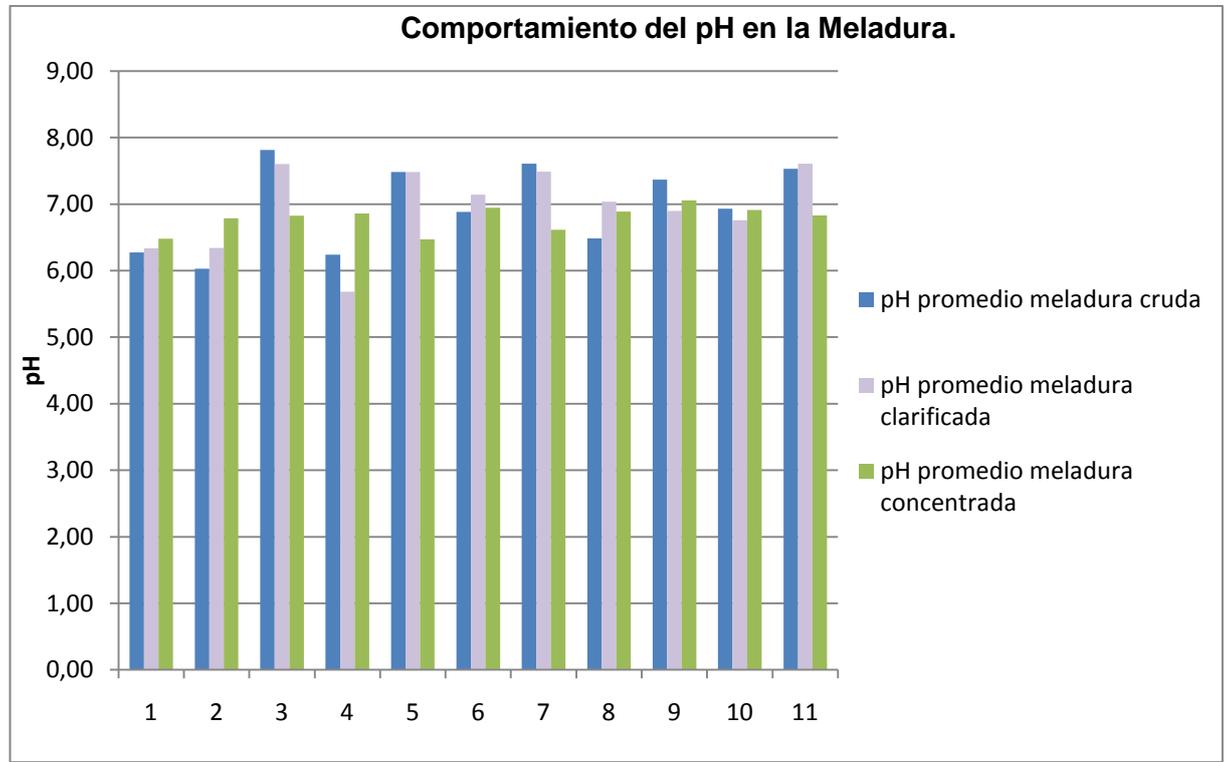
Como se puede observar en la grafica, los valores promedio de pH en la meladura clarificada tienen como valor máximo 7.61, y como valor mínimo 5.69, mostrando así, que siete de cada once datos, están cumpliendo con el parámetro de pH en el proceso, pero también se manifiesta pictóricamente, hay valores que no cumplen con la norma establecida, con valores ácidos que es la preocupación mayoritaria durante todo el proceso de producción, por ello, durante el proceso que prosigue para la meladura en la producción de azúcar, se tiene un control completo del pH para evitar la inversión de la sacarosa lo cual se traducen en el momento final, como pérdidas en la producción dado a que no se obtiene la cantidad de azúcar requerida.

Los valores de pH mayor a 7, considerados como pH básicos, no afectan la sacarosa, ya que desde el punto de vista de la pérdida directa de sacarosa, la descomposición de la misma bajo condiciones básicas no es tan seria como la que se produce bajo condiciones ácidas, pero es más grave desde el punto de vista de la formación de color, la que da lugar a un mayor procesamiento y pérdidas, en melazas.

Los principales productos de la descomposición alcalina son los ácidos orgánicos, especialmente en el ácido láctico que tienden a disminuir el pH y los productos coloreados poliméricos, bien sean melanoidinas o compuestos formados mediante una serie de reacciones catalizadas por iones de calcio.

Esta situación aparece cuando se permite que el jugo se mantenga con un pH ácido durante cierto tiempo antes de la elevación del mismo. En este caso se dice que la cal destruye el azúcar invertido; pero las reacciones de destrucción generan color.

Grafico 10.Comportamiento del pH en la meladura.



Otra causa importante en el momento de considerar un bajo pH, es la formación de las dextranas que se pueden generara dentro del proceso, causada principalmente por la bacteria *Leuconostoc mesenteroides*, así como la *Leuconostoc dextraricum* y por otras bacterias formadoras de légamo. La dextrana provoca la prolongación de cristal de sacarosa a lo largo del eje "C" (el llamado grano "de aguja").

No todos los tipos de *Leuconostoc mesenteroides* crecen en una solución, de sacarosa y entre los que lo hacen, ninguno sintetiza dextrana por encima de los 60°C o con un alto grado Brix.

Es así como, por cada molécula de sacarosa consumida, solamente la porción de glucosa se utiliza en la formación de dextrana, permaneciendo un núcleo de fructosa. Esta fructosa se descompone subsiguientemente en ácidos orgánicos y componentes colorantes, dando lugar a una disminución en el pH, que a su vez, aumenta el nivel de inversión, llevando a una pérdida adicional de ácidos y colorantes a partir del azúcar invertido así formado.

Son subproductos de la formación enzimática de dextrana, el ácido láctico y acético, el manitol y el etanol, los cuales destacan el problema de caída de pH la formación de colorante y aumento de las pérdidas de sacarosa en melazas.

Hay diferentes productos químicos que controlan los microorganismos presentes en el jugo de caña, pero hay muy pocos que puedan proveer el control de ellos a la vez que proveen control de la enzima invertasa bajo las condiciones prácticas de la manufactura de azúcar en el control.

Una de las ventajas que se debe señalar en el uso de agentes sanitarios es el control de la acumulación de dextrana. Como resultado del incremento de la población de *Leuconostoc mesenteroides* en el jugo de caña durante la extracción en el molino. La dextrana induce la elongación del cristal de azúcar, no solo reduce el tiempo de crecimiento de éste sino también aumenta la formación de grano falso.

El control de esta goma también se podría correlacionar con un mejor agotamiento de las mieles finales.

Otra de las causas de la pérdida química de la sacarosa durante el proceso, es que esta incluye la descomposición térmica en productos acaramelados. Hay dos divisiones generales de las reacciones de descomposición química:

Las que se realizan bajo condiciones ácidas y las que lo hacen bajo condiciones básicas. El pH óptimo para la estabilidad de la sacarosa se sitúa entre 8 y 8.5.

En Condiciones ácidas, La reacción inicial es la inversión de la sacarosa en glucosa y fructosa. En el jugo o meladura, esta reacción puede resultar catalizada por la enzima invertasa y, en cualquier medio ambiente, por un bajo pH.

La enzima invertasa se inactiva por un aumento de la temperatura a 80°C o más, y la inversión ácida se inhibe mediante la elevación del pH por encima de 6,0.

Como se menciona anteriormente la desventaja de que se presenten condiciones básicas, es la generación de color que da lugar a un mayor procesamiento y pérdidas en melazas.

Por lo tanto los microorganismos contribuyen en la pérdida de rendimiento de azúcar de dos maneras:

- Incuestionablemente son la principal fuente de invertasa en el jugo de caña.
- La transferencia de energía requerida para que la reacción siga avanzando hacia la destrucción de azúcar y pérdidas para el ingenio es generada por microorganismos que utilizan la energía obtenida de la inversión de la sacarosa para su crecimiento y reproducción.

Los bactericidas son productos químicos resultantes de un inmenso programa de investigación y experimentación industrial.

Estos insecticidas usados en los ingenios azucareros, son efectivos contra una amplia gama de microorganismos encontrados en sistemas-industriales.

En el proceso de fabricación de azúcar, los microorganismos presentes en los jugos, tienden a ser eliminados sucesivamente por los métodos de clarificación y por las variaciones de las temperaturas que prevalecen durante el proceso.²⁷

Estadísticos descriptivos

Tabla 9. Estadísticos descriptivos del pH en la meladura.

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.	Varianza	C.V (%)
pH meladura cruda	33	5,89	8,35	7,0958	0,69567	0,484	9.80
pH meladura clarificada	33	38,05	64,15	47,861	5,39836	29,142	11.28
pH meladura concentrada	50	5,91	7,43	6,7568	0,37882	0,144	5.61
N válido	33						

²⁷ <http://www.monografias.com/trabajos58/evaluacion-inversion-sacarosa/evaluacion-inversion-sacarosa2.shtml>

14.5 SACAROSA EN MELADURA.

La sacarosa, azúcar de caña, (nombre químico del azúcar de mesa) es un disacárido formado por una molécula de glucosa y otra de fructosa. La sacarosa (azúcar de mesa) es un disacárido de glucosa y fructosa. Se sintetiza en plantas pero no en animales superiores. No contiene ningún átomo de carbono anomérico libre, puesto que los carbonos anoméricos de sus dos unidades monosacáridos constituyentes se hallan unidos entre sí covalentemente mediante un enlace O-glucosídico. Por esta razón, la sacarosa no es un azúcar reductor y tampoco posee un extremo reductor.

Su nombre abreviado puede escribirse como Glc(a -1à 2) Fru. La sacarosa es un producto intermedio principal de la fotosíntesis, en muchas plantas constituye la forma principal de transporte de azúcar desde las hojas a otras partes de la planta. En las semillas germinadas de plantas, las grasas y proteínas almacenadas se convierten en sacarosa para su transporte a partir de la planta en desarrollo.

Es un disacárido que no tiene poder reductor sobre el licor de Fehling.

En la naturaleza se encuentra en un 20% del peso en la caña de azúcar y en un 15% del peso de la remolacha azucarera, de la que se obtiene el azúcar de mesa. La miel también es un fluido que contiene gran cantidad de sacarosa parcialmente hidrolizada.

El azúcar de mesa es el edulcorante más utilizado para endulzar los alimentos y suele ser sacarosa.

Una curiosidad de la sacarosa es que es triboluminiscente, que produce luz mediante una acción mecánica.

Dentro de las propiedades físicas de la sacarosa, se encuentra principalmente:

- Sabor dulce: La sacarosa es el edulcorante estándar. La capacidad de otros edulcorantes se mide tomando la de la sacarosa como valor igual a 1.
- Se torna Transparente cuando forma cristales. En masas de pequeños cristales o en polvo toma color blanco.
- La sacarosa es dextrógira: En disolución gira el ángulo de la luz polarizada $66,5^\circ$ hacia la derecha (dextrógira)
- Cristaliza con facilidad debido a que, a diferencia de otros azúcares no presenta mutarrotación.

- La solubilidad de la sacarosa es bastante alta. Puede permanecer disuelta a concentraciones superiores a su solubilidad en un estado meta estable si no se favorece su cristalización agitando, removiendo o por la presencia de impureza o irregularidades. Al disolverse incrementa la viscosidad y provoca propiedades coligativas, que dependen únicamente de la concentración molar (es decir, de la cantidad de partículas de soluto por cada kilogramo de solvente) y no de la naturaleza o tipo de soluto.
- Descenso crioscópico: descenso del punto de congelación debido a que el soluto obstaculiza la formación de cristales sólidos.
- Aumento del punto de ebullición.
- Presión osmótica: Es el paso espontáneo de moléculas de disolvente desde una solución más diluida hacia una solución más concentrada, cuando se hallan separadas por una membrana semipermeable.
- Es higroscópica: su alta afinidad por el agua la hace retener moléculas de esta sustancia e incluso fijar hasta 1% a partir de la humedad ambiental. Desprende esta humedad al calentarla hasta 90°C

Acerca de sus propiedades químicas se hallan principalmente:

- Se hidroliza a glucosa y fructosa por acción de ácidos o en presencia de enzima invertasa. Cuando esto ocurre cambia el ángulo de giro de la luz polarizada, ya que el efecto combinado de la glucosa (52° a la derecha) y la fructosa (92° a la izquierda) supone un giro de 19,9° a la izquierda.
- La sacarosa fermenta por acción de bacterias dando alcohol etílico.
- Se descompone por el calor a partir de los 150°C dando una gran variedad de sustancias responsables del color, sabor y olor a caramelo.
- No tiene poder reductor, ya que, a diferencia de otros azúcares, no presenta grupos carbonilo.

El reconocimiento químico de la sacarosa se puede determinar mediante varios ensayos, entre ellos se encuentra:

- Ensayo de Molisch

Sirve para reconocer la presencia de glúcidos en general. Se basa en que son capaces de deshidratarse, mezclados con ácidos concentrados, produciendo un derivado furfurálico. El furfural, en presencia de -naftol, se condensa produciendo un color más o menos intenso que oscila del violeta al rojo.

- Ensayo del Lugol

Una vez que tenemos la certeza de la presencia de glúcidos en la muestra, se intenta especificar de cuál se trata. Para descartar que sea un polisacárido se realiza el ensayo del lugol.

- Ensayo de Fehling:

Es un ensayo específico de aldehídos, basado en su fácil oxidación a ácidos carboxílicos. Se emplea como oxidante el ión cúprico en medio básico, la precipitación de oxido cuproso (rojo) indica la presencia de un aldehído.

Si la reacción es positiva se forma un precipitado rojo de Cu_2O , que indica que se trata de un azúcar reductor. Si es negativa es un azúcar no reductor: sacarosa.

Para el fin de esta investigación se hizo uso del sistema del laboratorio que calcula la sacarosa y pureza dado el ángulo de rotación que se obtiene de la polarización de la muestra, que es determinada con un polarímetro, donde se correlaciona también con los grados brix de la muestra, este procedimiento fue explicado en la página 65, determinación de sacarosa y pureza.

A continuación se expresara el comportamiento de los datos obtenidos en meladura clarificada y concentrada, no se trataron muestras de meladura cruda, dado a que en el proceso de clarificación no existen cambios significativos de concentración, como se ha explicado anteriormente.

Grafico 11. Comportamiento de la sacarosa en la meladura.

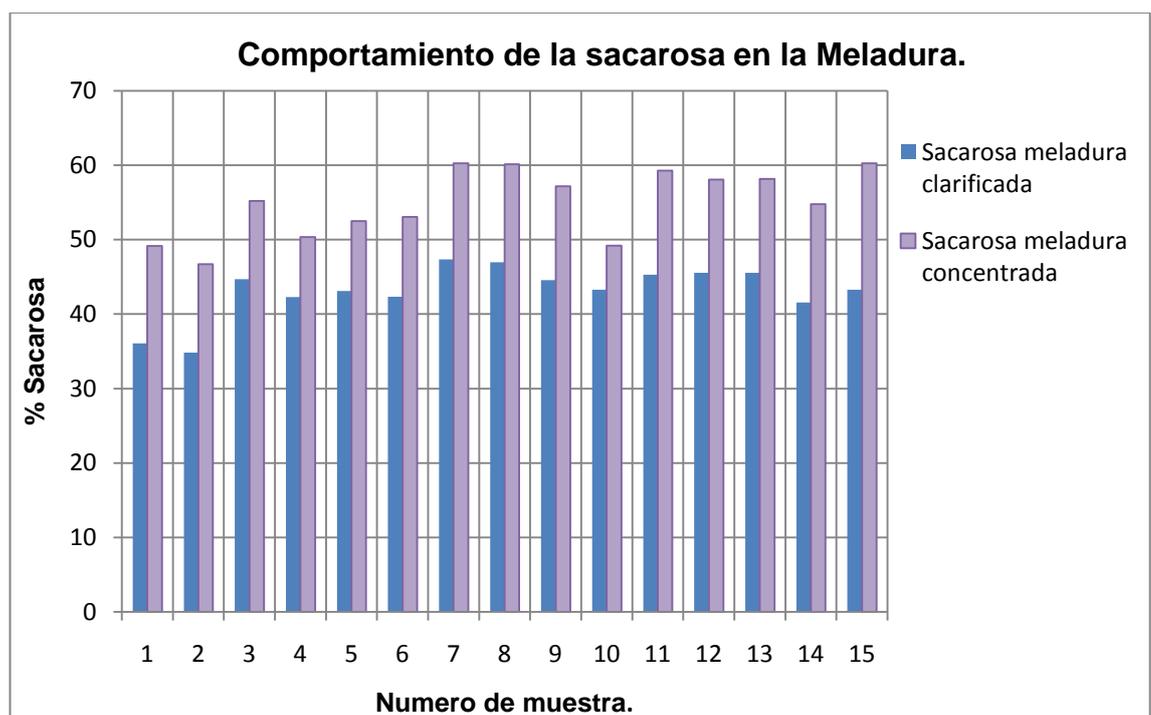


Tabla 10. Datos del comportamiento de sacarosa en la meladura.

Numero de muestra.	Sacarosa meladura clarificada	Sacarosa meladura concentrada
1	36,06088	49,17511
2	34,84657	46,71832
3	44,67756	55,20868
4	42,27446	50,34264
5	43,12233	52,51812
6	42,35478	53,04496
7	47,33265	60,26152
8	46,98585	60,12944
9	44,57848	57,16640
10	43,26491	49,18498
11	45,30141	59,28562
12	45,55146	58,08834
13	45,56162	58,17912
14	41,57371	54,76615
15	43,28966	60,25690

Como se puede observar en el grafico 11, el valor máximo promedio que se encontró para la meladura concentrada, que es el objeto de mayor interés en este segmento de la investigación, es de 60,26152 %, lo cual corresponde a un pH de 6,75, grados brix 64.92, y turbiedad 37, teniendo en cuenta que esta lectura de turbiedad fue realizada a la muestra tratada, donde se obtuvo una dilución de 1:3, una parte de meladura por tres partes de agua, en la metodología de este ensayo, se expresa bien las cantidades, en la tabla 10 aparece la tabulación promedio de los datos.

14.6 PUREZA DE LA MELADURA

La pureza es considerada como un factor muy importante e influyente durante la producción de azúcar, ya que desde el momento en que arriba la caña, esta prueba es de gran importancia, La caña para ser procesada debe tener una pureza mínima del 75%, después del proceso de extracción, en la dependencia de elaboración del Ingenio Risaralda S.A, se recibe en la etapa de clarificación y concentración el jugo que se encuentra con alto contenido de impurezas. El jugo mixto de los molinos, mediante procesos químicos y físicos purifica el jugo obteniéndose sacarosa en forma de cristal de alta pureza.

En este proceso de concentración del jugo de caña, pasando de 15 a 60° Brix, teniendo ya consistencia de jarabe. A partir de aquí se puede pasar a una segunda clarificación o pasar a la cristalización. En el caso de pasar directamente a la cristalización es cuando se obtiene el azúcar moreno porque es el resultado de cristalizar la sacarosa con todas las sales disueltas y otros componentes que arrastra en la primera etapa de clarificación.

En la cristalización, el azúcar “solidifica” en forma de cristales cuando se encuentra sobresaturado. Se consigue por cocimiento en evaporadores al vacío y repitiendo la operación hasta tres veces, hasta conseguir un contenido en sólidos solubles de hasta 92°

Brix. En este momento se introducen partículas sólidas de azúcar que servirán como núcleo de cristalización para la formación de nuevos cristales de azúcar.

Esta masa cocida, mezcla de cristales de azúcar con un líquido (melaza) pasa a la centrifugación con el objetivo de separarlos y continuar con el refinado, que vuelve a incluir etapas de clarificación, concentración, cristalización y centrifugación. Todas ellas con el fin de eliminar las materias no deseables que se han arrastrado en todo el proceso de extracción. Al final de ésta etapa se consigue un azúcar refinado de pureza del 99,9 %, es decir, una concentración de sacarosa mínima del 99,9 %.

Es por ello que la sacarosa y la pureza, intervienen significativamente en la clasificación de los tipos de azúcar, dado a que La clasificación del azúcar depende del contenido en tanto por ciento de sacarosa, que se asocia a la pureza del azúcar y también afecta al color. Así, de una manera general, a menos coloración más pureza y más contenido de sacarosa.

Grafico 12. Comportamiento de la pureza en la meladura clarificada y meladura concentrada.

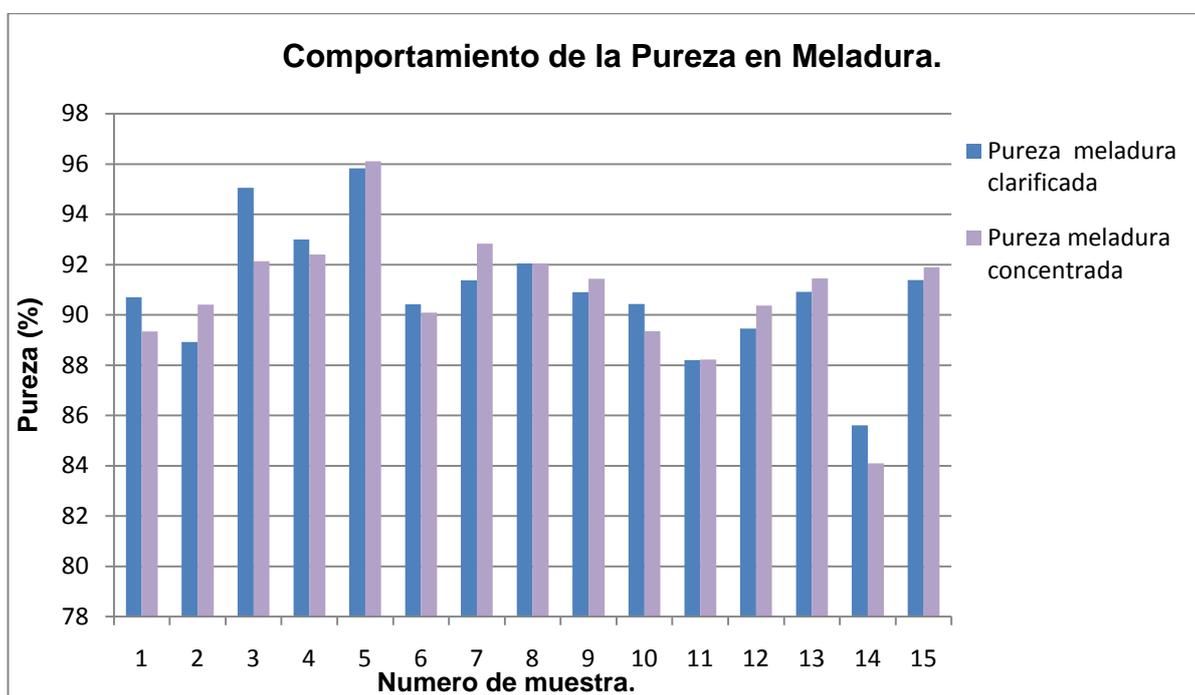


Tabla 11. Datos correspondientes al comportamiento de la pureza en la meladura clarificada y meladura concentrada.

Numero de muestra	Pureza meladura clarificada	Pureza meladura concentrada
1	90,69638	89,34431
2	88,92984	90,41243
3	95,05864	92,13732
4	93,00423	92,40573
5	95,8274	96,11662
6	90,42438	90,08995
7	91,37577	92,83428
8	92,05364	92,05364
9	90,90288	91,43698
10	90,43668	89,36225
11	88,20368	88,22265
12	89,45691	90,36767
13	90,91366	91,44695
14	85,61308	84,10035
15	91,38691	91,89632

Grafico 13. Relación entre la pureza y la sacarosa en la meladura concentrada.

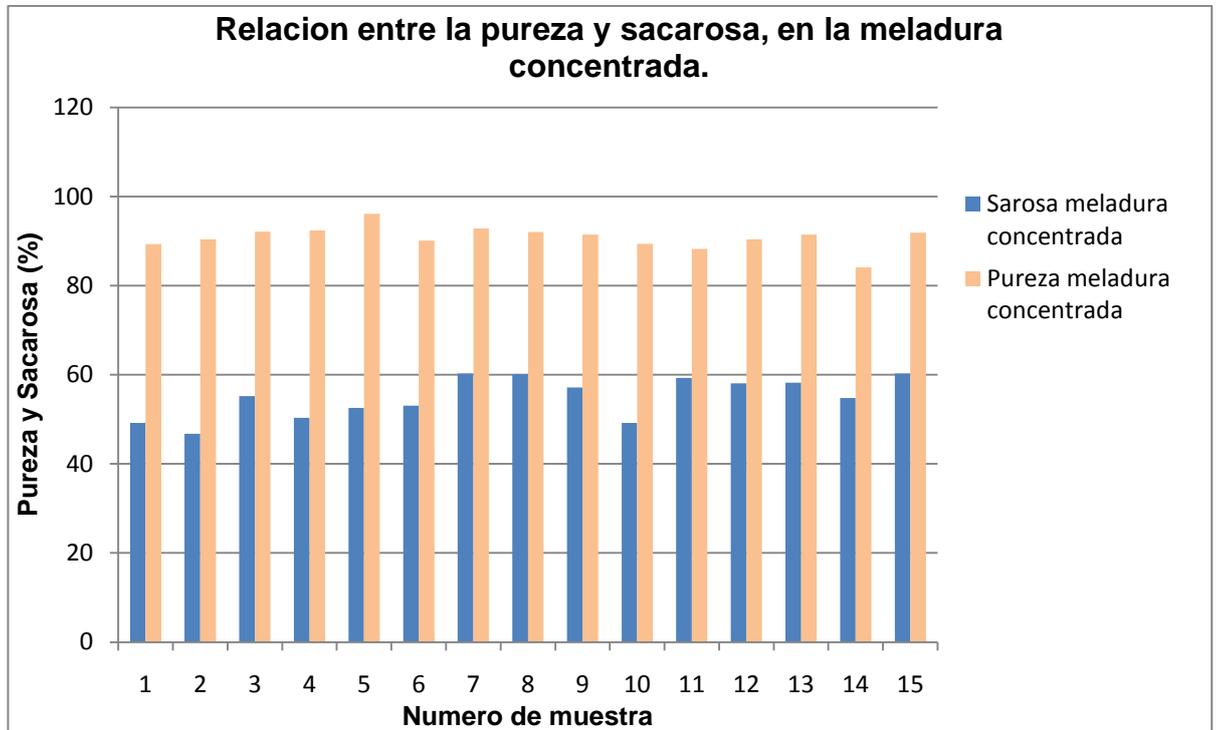


Tabla 12. Datos correspondientes a la relación entre pureza y sacarosa en meladura concentrada.

Numero de muestra	Sacarosa meladura concentrada	Pureza meladura concentrada
1	49,17511	89,34431
2	46,71832	90,41243
3	55,20868	92,13732
4	50,34264	92,40573
5	52,51812	96,11662
6	53,04496	90,08995
7	60,26152	92,83428
8	60,12944	92,05364
9	57,16642	91,43698
10	49,18498	89,36225
11	59,28562	88,22265
12	58,08834	90,36767
13	58,17912	91,44695
14	54,76615	84,10035
15	60,25690	91,89632

En el anexo E se presenta un gráfico donde se relaciona la pureza y la sacarosa en la meladura, allí podemos observar que la pureza de la meladura clarificada y de la meladura concentrada se encuentran altamente relacionadas, notándose los mayores valores en la pureza de la meladura concentrada, esto demuestra que se está logrando el objetivo principal de la fábrica, porque como ya se mencionó anteriormente, para lograr un grano de azúcar de alta pureza, se necesita que la meladura que alimenta a los tachos, sea de alta pureza también, ya que esta es la que genera el grano con la semilla, de esta manera la calidad del producto final aumenta.

Estadísticos descriptivos

Tabla 13. Estadísticos descriptivos de sacarosa y pureza en meladura.

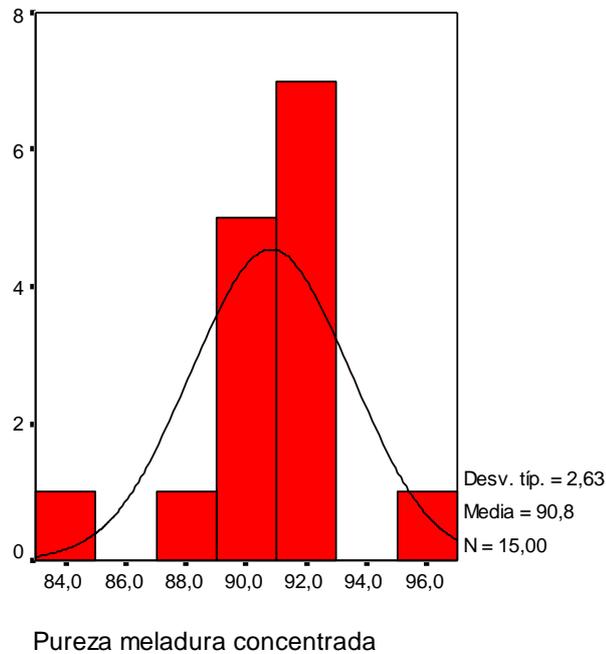
	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.	Varianza	C.V (%)
Pureza meladura clarificada	15	85,61	95,83	90,9523	2,52732	6,387	2.78
Sacarosa meladura clarificada	15	34,85	47,33	43,1184	3,54460	12,564	8.22
Pureza meladura concentrada	15	84,10	96,12	90,8152	2,63115	6,923	2.90
Sacarosa meladura concentrada	15	46,72	60,26	54,9551	4,57013	20,886	8.32
N válido	15						

En estadística, un histograma es una representación gráfica de una variable en forma de barras, donde la superficie de cada barra es proporcional a la frecuencia de los valores representados. En el eje vertical se representan las frecuencias, y en el eje horizontal los valores de las variables, normalmente señalando las marcas de clase, es decir, la mitad del intervalo en el que están agrupados los datos.

Se utiliza cuando se estudia una variable continua, por comodidad, sus valores se agrupan en clases, es decir, valores continuos. En los casos en los que los datos son cualitativos (no-numéricos), como sexto grado de acuerdo o nivel de estudios, es preferible un diagrama de sectores.

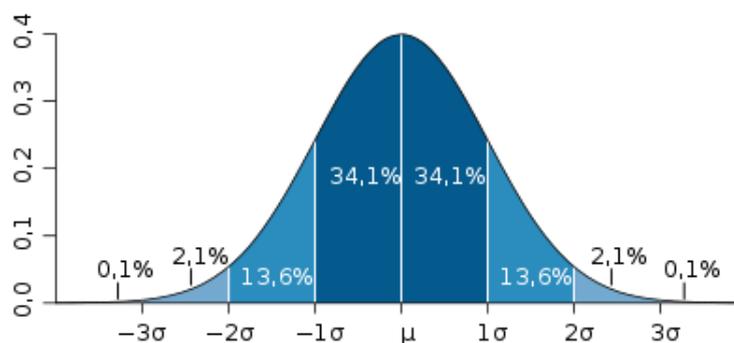
Los Diagramas de barras simples Representan la frecuencia simple (absoluta o relativa) mediante la altura de la barra la cual es proporcional a la frecuencia simple de la categoría que representa.

Grafico 14. *Histograma de frecuencia de la pureza de meladura concentrada.*



Según la Distribución de probabilidad alrededor de la media en una distribución, que se muestra en la figura 20, el anterior histograma presenta la mayor frecuencia de datos, que representa el 34,1 %, que corresponde al rango de 90-92% de Pureza en la meladura concentrada, según esta interpretación.

Figura 24. *Distribución de probabilidad alrededor de la media en una distribución $N(\mu, \sigma)$.*



14.7 COLOR EN LA MELADURA

Los constituyentes de la caña de azúcar, se derivan de pequeñas cantidades de pigmentos naturales tales como clorofilas, carotenoides, y antocianinas, que se encuentran generalmente en la planta. En gran parte el color también resulta del material coloreado formado por degradación de los azúcares, por reacciones polifenol-hierro, por reacciones entre azúcares reductores y los aminoácidos, y por otras reacciones similares que tienen lugar durante el proceso de fabricación.

Dichos componentes coloreados se encuentran formando parte de muchas combinaciones, desde un punto de vista práctico estos constituyentes no pueden ser separados, debiéndose considerar que el color es una propiedad particular del azúcar.

El azúcar puede formar caramelo al calentarse por encima de su punto de descomposición (reacción de caramelización). Si se calienta por encima de 145 °C en presencia de compuestos amino, derivados por ejemplo de proteínas, tiene lugar el complejo sistema de reacciones de Maillard (se mencionara mas adelante), que genera colores, olores y sabores generalmente apetecibles, y también pequeñas cantidades de compuestos indeseables.

El azúcar blanco es sometido a un proceso de purificación químico, haciendo pasar a través del jugo de caña, gas SO₂ llamado proceso de sulfitación, que proviene de la combustión del azufre. Hay una creencia arraigada de que el azúcar de tono más oscuro es más saludable, esto no es totalmente cierto. La película de miel que rodea al cristal de azúcar morena o rubia contiene sustancias como minerales y vitaminas. Estas sustancias se les llama en el argot azucarero: impurezas. Cabe aclarar que durante el proceso a todas las sustancias que no son sacarosa, se les denomina impurezas, pero son inofensivas para la salud. Son éstas las que le otorgan el color y sabor particular, pero se encuentran en ínfimas cantidades que, desde el punto de vista nutricional, no tienen importancia, ya que serían necesarios consumos desmesurados de azúcar de este tipo para que estos otros componentes se ingirieran en cantidades relevantes.

El azúcar se puede clasificar por su origen, pero también por su grado de refinación. Normalmente, la refinación se expresa visualmente a través del color (azúcar moreno, azúcar rubio, blanco), que está dado principalmente por el porcentaje de sacarosa que contienen los cristales.

- Azúcar moreno, el auténtico azúcar moreno (también llamado “negro” o “crudo”) se obtiene del jugo de caña de azúcar y no se somete a refinación, sólo cristalizado y centrifugado. Este producto integral, debe su color a una película de melaza que envuelve cada cristal.

Normalmente tiene entre 96 y 98 grados de sacarosa. Su contenido de mineral es ligeramente superior al azúcar blanco, pero muy inferior al de la melaza.

- Azúcar rubio, es menos oscuro que el azúcar moreno o crudo y con un mayor porcentaje de sacarosa.
- Azúcar blanco, con 99,5% de sacarosa. También denominado azúcar sulfitado.
- Azúcar refinado es altamente puro, es decir, entre 99,8 y 99,9 % de sacarosa. El azúcar rubio se disuelve, se le aplican reactivos como fosfatos, carbonatos, cal para extraer la mayor cantidad de impurezas, hasta lograr su máxima pureza. En el proceso de refinamiento se desechan algunos de sus nutrientes complementarios, como minerales y vitaminas.

No todo el azúcar de color blanco proviene de un proceso de refinado.

El azúcar moreno es un azúcar de sacarosa que tiene un color marrón característico debido a la presencia de melaza. Es un azúcar sin refinar o parcialmente refinado formado por cristales de azúcar con algún contenido residual de melaza o producido por la adición de melaza al azúcar blanco refinado.

El azúcar moreno incluye del 3,5% (azúcar moreno claro) al 6,5% (azúcar moreno oscuro) de melaza.

Grafico 15. Variación de color en la meladura cruda y meladura clarificada.

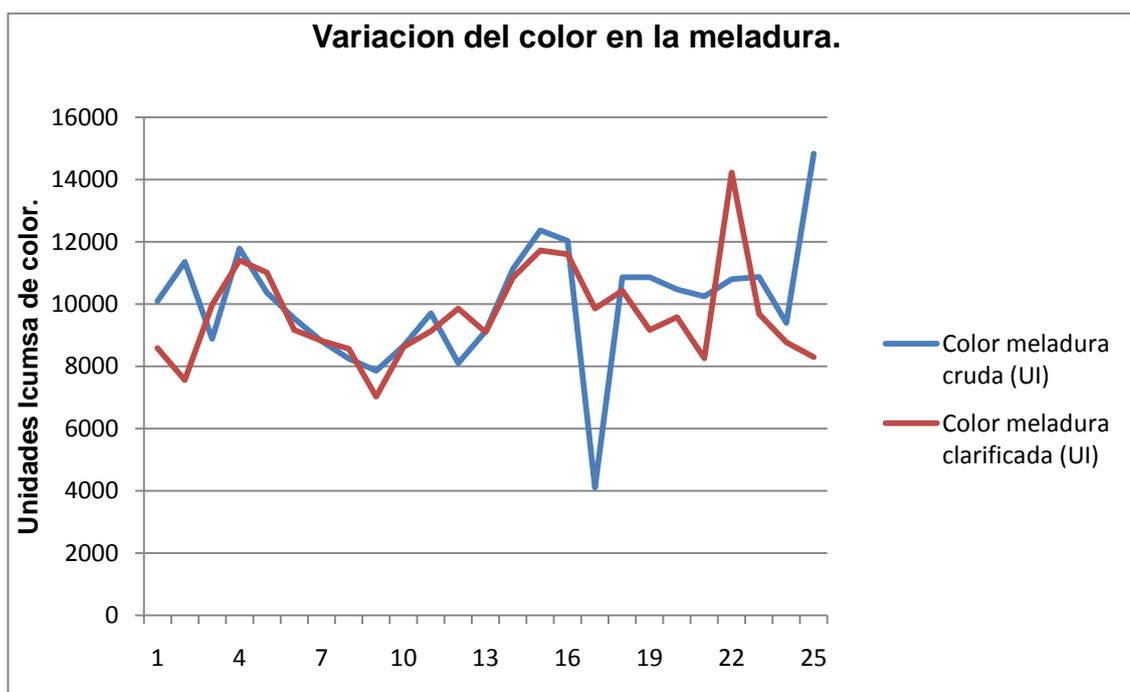


Grafico 16. Variación de color y turbiedad de meladura clarificada.

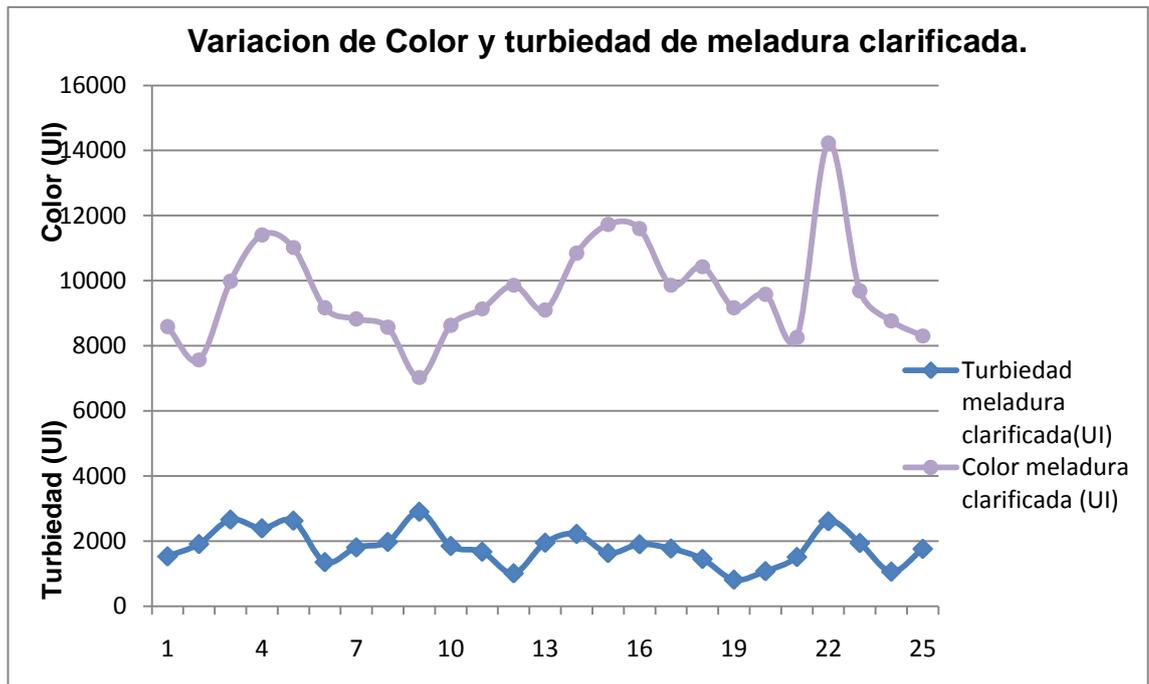
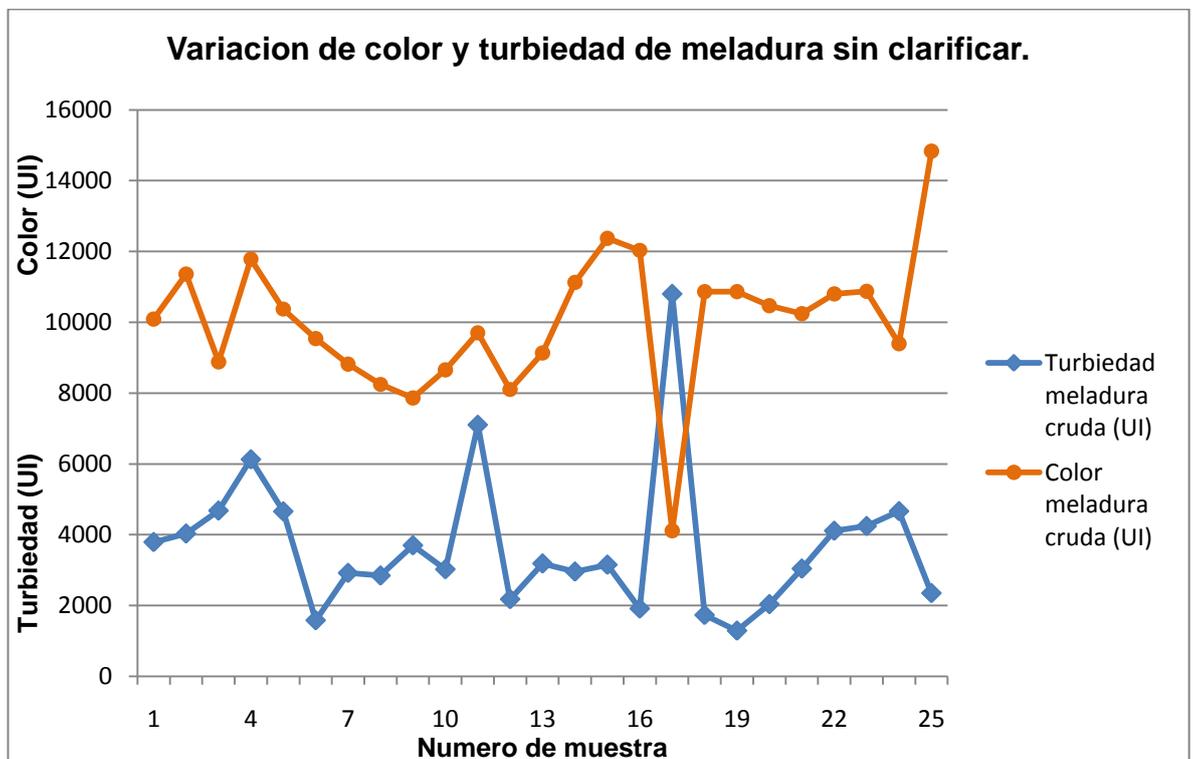


Grafico 17. Variación de color y turbiedad en meladura sin clarificar.



En el proceso de elaboración de azúcar, al clarificar el jugo crudo de la caña, el calor y la cal incrementan el color debido a que descomponen los azúcares reductores. La presencia de hierro proveniente del equipo tiende también a incrementar el color obtenido debido a su reacción con los polifenoles. En las operaciones de evaporación y de cristalización puede desarrollarse color, debido a la caramelización, a los productos en descomposición causada por el sobrecalentamiento. En las operaciones de refinación la solución se debe mantener con un pH lo más cercano a 7,0, evitándose a su vez las temperaturas excesivas.

Es un hecho que el color del azúcar depende en gran parte del pH de la solución. Esto se debe al diferente color que tiene algunas sustancias a diferente grado de acidez y alcalinidad, siendo la materia colorante, en este caso, un indicador natural del pH. En general el color es más claro en las soluciones ácidas que en las soluciones alcalinas, esto fue observado en diversos muestreos y procesos de decoloración.

Materiales coloreados provenientes de la caña:

- Las sustancias de la caña que ya tenían color en su forma original, es decir, cuando la materia prima no se ha sometido a ningún proceso mecánico ni químico.
- Las sustancias de la caña que son normalmente incoloras en su forma elemental, pero pueden desarrollar color después de la extracción de jugo de caña.
- Los compuestos coloreados que se forman durante el proceso por descomposición de algunos productos y por otras reacciones químicas.

Materiales no azúcares coloreados existentes originalmente en la caña:

- Clorofilas: la clorofila es la cromo proteína que forma la materia colorante verde de las plantas. La clorofila forma una masa suave, insoluble en agua y en soluciones de azúcar pero solubles en alcohol, éter, álcalis y en otras sustancias, es de naturaleza coloidal. En el jugo de caña la clorofila está presente en suspensión, lo que facilita la separación durante el proceso, asegurando su ausencia en las melazas.
- Xantofila: constituye el pigmento amarillo presente en las plantas. Es insoluble en agua y en soluciones de azúcar, lo que no influye en el proceso de fabricación.

- Caroteno: son pigmentos amarillos. Son insolubles en agua y en solución de azúcar, por lo tanto no influye en el jugo de caña.
- Antocianina: termino general para sustancias rojas, azules y violetas que se encuentran en las plantas. Son solubles en agua, perteneciendo al grupo de compuestos orgánicos clasificados como glucósidos. Con acido clorhídrico concentrado toman color rojo, y con hidróxido de sodio 10% se vuelven de color violeta rojizo. La antocianina está ausente en variedades de caña blanca o amarilla, pero es muy evidente en las de color oscuro.

Al molerse la caña, las antocianinas entran en el jugo y al añadirse cal este forma un color verde oscuro, pero no se precipita, excepto en una solución fuertemente alcalina. Esta sustancia pertenece al grupo de los polifenoles que se oscurecen, al combinarse con las sales del hierro.

Las sulfitación separa parcialmente la antocianina y su cantidad varía dependiendo del tipo de caña.

Los Gráficos 16 y 17 muestran los rangos y las diferencias en los parámetros de color y turbiedad. Comparando los datos y teniendo en cuenta que el material sin clarificar fue muestreado en el mismo momento que el material clarificado se observa que la eliminación de color esta alrededor de 1000 UI a 2000 UI, esta es una manera de evaluar la eficiencia del clarificador, ya que un objetivo de esta etapa de clarificación de meladura, es remover impurezas y color del material, que permita la obtención de un grano de azúcar de alta pureza, y optimo color, ya que como se menciona anteriormente estas variables se encuentran relacionadas en el momento de realizar la clasificación del azúcar.

Es necesario tener en cuenta los demás parámetros del material que todos ellos son indicadores de la calidad de este. Después de clarificada la meladura presenta aumento de pH y brix en la mayoría de los casos, mostrando así un aumento en la calidad del material en proceso el cual seguramente se verá reflejado en el producto final.

Estos datos se encuentran tabulados en el anexo F, para tener mayor claridad acerca del tema tratado se elabora un grafico a modo de comparación del color y la turbiedad en la meladura cruda y en la meladura clarificada, este se encuentra en el anexo G.

Estadísticos descriptivos

Tabla 14. Estadísticos descriptivos del color y la turbiedad en la meladura.

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.	Varianza	C.V (%)
Turbiedad (UI) Meladura Cruda	25	1287,73	10802,35	3684,0920	2030,515	4122990,368	55.12
Color (UI) Meladura Cruda	25	4109,59	14833,66	10021,626	1985,215	3941077,363	19.81
Turbiedad (UI) Meladura Clarificada	25	810,81	2896,36	1811,0568	543,5648	295462,734	30.01
Color (UI) Meladura Clarificada	25	7024,52	14227,01	9653,3164	1542,307	2378711,091	15.98
N válido (según lista)	25						

El coeficiente de variación (CV). Es una medida de dispersión relativa de los datos y se calcula dividiendo la desviación típica maestra por la media y multiplicando el cociente por 100. Su utilidad estriba en que nos permite comparar la dispersión o variabilidad de dos o más grupos.

Como se puede observar en la tabla 14 la turbiedad en la meladura cruda, es la medida más dispersa que se obtuvo en esta etapa de la investigación, por tanto es evidente que se debe de tener mayor control para mejorar esta medida, ya que como se ha mencionado anteriormente, la turbiedad es la medida más adecuada para evaluar la eficiencia del proceso de clarificación de meladura.

14.8 AZUCARES REDUCTORES:

Los azúcares reductores, se definen en forma breve, como aquellos azúcares que poseen su grupo carbonilo (grupo funcional) intacto, y que a través del mismo pueden reaccionar con otras especies.

Los azúcares reductores provocan la alteración de las proteínas mediante la reacción de glucosilación no enzimática también denominada reacción de Maillard o glicación.

Esta reacción se produce en varias etapas: las iniciales son reversibles y se completan en tiempos relativamente cortos, mientras que las posteriores transcurren más lentamente y son irreversibles.

Los azúcares reductores provocan la alteración de las proteínas mediante la reacción de glucosilación no enzimática también denominada reacción de Maillard o glicación. Esta reacción se produce en varias etapas: las iniciales son reversibles y se completan en tiempos relativamente cortos, mientras que las posteriores transcurren más lentamente y son irreversibles.

Desde el punto de vista químico, la glucosilación se define como la reacción de grupos amino primario de aminoácidos, péptido y proteínas con el grupo carbonilo de los azúcares reductores. A lo largo de esta reacción se pueden distinguir tres etapas: inicialmente se produce la asociación del azúcar con la proteína, formando un compuesto denominado base de Schiff, la estructura de este compuesto se reordena hacia una forma más estable, denominada producto de Amadori, Éste posteriormente sufre una serie de complejas transformaciones que conducen a la formación de compuestos generalmente coloreados y/o fluorescentes²⁸.

En condiciones fisiológicas la aparición de estos compuestos está determinada por la concentración de azúcares reductores y por el tiempo de exposición de la proteína a los mismos.

Reacción de Maillard²⁹

Es una reacción química de pardeamiento no enzimático que tiene lugar cuando en un alimento coincide la presencia de azúcares reductores (glucosa, fructosa, etc.), moléculas derivadas de proteínas y además se somete a un tratamiento térmico de elevada temperatura y/o tiempos largos. En estas

²⁸ <http://www.ciencia.cl/CienciaAlDia/volumen3/numero2/articulos/articulo2.html> LA GLUCOSILACION NO ENZIMATICA DE LAS PROTEINAS. Mecanismo y papel de la reacción en la diabetes y el envejecimiento. Luis González Flecha, Pablo R. Castello, Juan J. Gagliardino y Juan Pablo F.C. Rossi 2000

²⁹ www.aulachocovic.es . Azúcar. Por BDN www.bdnhome.com

condiciones tienen lugar una serie de reacciones encadenadas que dan como resultado las siguientes modificaciones del producto:

- El color se oscurece por formación de pigmentos pardos conocidos como melanoidinas.
- Se obtienen compuestos volátiles de aromas muy diversos.
- El sabor también se modifica hacia sabores tostados y algo amargos.
- Pérdida de moléculas de interés nutritivo, al intervenir en la reacción aminoácidos esenciales como la lisina o la metionina.

Existen alimentos en los que la reacción de Maillard es una etapa y un cambio deseado dentro del proceso de producción (dulce de leche, tostado del café, horneado de productos de pastelería), en otras ocasiones, en cambio queremos evitar que tenga lugar la reacción de Maillard.

Además otros factores que favorecen esta reacción son la baja actividad de agua del medio, y los tiempos de almacenamiento largos a temperaturas más o menos elevadas (30-35° C).

Existe la posibilidad de disponer de una serie de reacciones que permiten caracterizar determinados grupos funcionales. En algún caso varios grupos funcionales pueden dar una misma reacción, por lo que será necesario aplicar alguna otra reacción característica para estar seguros de la naturaleza de los mismos.

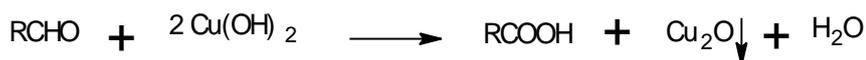
Reacción de Fehling:

El reactivo de Fehling, también conocido como Licor de Fehling, se utiliza como reactivo para la determinación de azúcares reductores. Sirve para demostrar la presencia de glucosa, así como para detectar derivados de esta tales como la sacarosa o la fructosa.

El licor de Fehling consiste en dos soluciones acuosas:

- Sulfato de cobre cristalizado, 35 g; agua destilada, hasta 1.000 ml.
- Sal de Seignette (Tartrato mixto de Potasio y Sodio), 150 g; solución de hidróxido de sodio al 40%, 3; agua, hasta 1.000 ml.

Ambas se guardan separadas hasta el momento de su uso para evitar la precipitación del hidróxido de cobre (II).



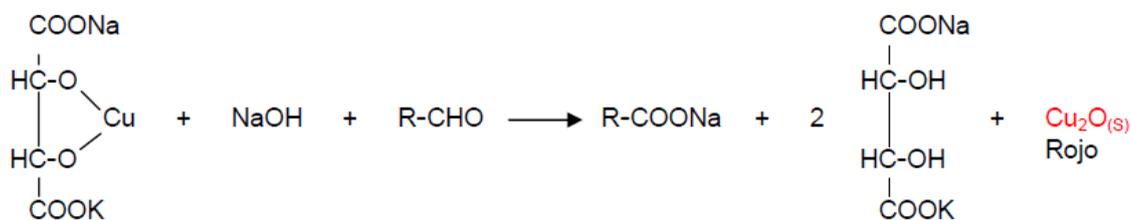
El ensayo con el licor de Fehling se fundamenta en el poder reductor del grupo carbonilo de un aldehído. Éste se oxida a ácido y reduce la sal de cobre (II) en medio alcalino a óxido de cobre (I), que forma un precipitado de color rojo. Un aspecto importante de esta reacción es que la forma aldehído puede detectarse fácilmente aunque exista en muy pequeña cantidad. Si un azúcar reduce el licor de Fehling a óxido de cobre (I) rojo, se dice que es un azúcar reductor.

Esta reacción se produce en medio alcalino fuerte, por lo que algunos compuestos no reductores con la fructosa que contiene un grupo cetona puede enolizarse a la forma aldehído dando lugar a un falso positivo.

Al reaccionar con monosacáridos, se torna verdoso; si lo hace con disacáridos, toma el color del ladrillo.

Ensayo con el reactivo de Fehling³⁰:

El reactivo de Fehling proporciona, a partir de la mezcla de dos soluciones al momento de usar, el ion cúprico que en medio alcalino en forma de un complejo cupro-tartárico, que oxida a los aldehídos pero no a las cetonas, de acuerdo con la siguiente reacción:



Ahora bien, se mostraran los resultados obtenidos en la investigación, donde se realizo la clasificación del porcentaje de los azucares reductores para la meladura clarificada y para la meladura concentrada.

³⁰ www.utadeo.edu.co/.../guia_5_reconocimiento_alcoholes_aldehidos_cetona.pdf

Grafico 18. Variación promedio de los azucares reductores en la meladura clarificada y meladura concentrada.

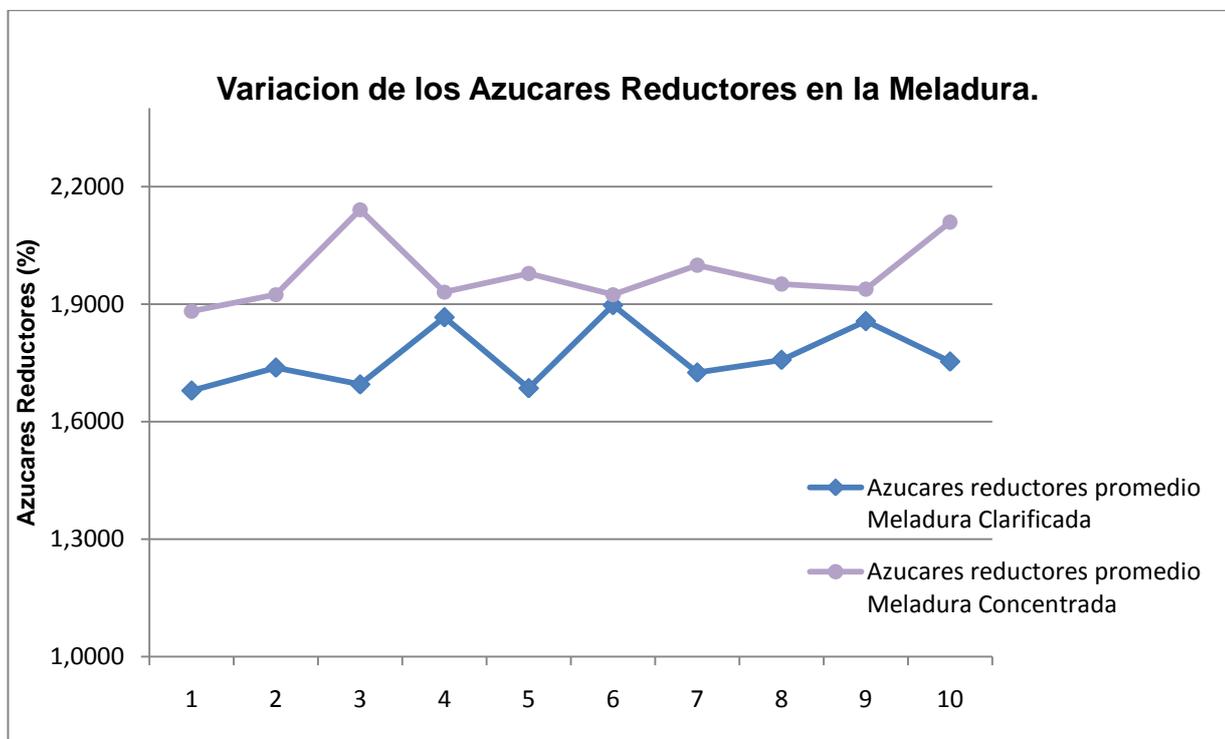


Tabla 15. Datos correspondientes a la Variación promedio de los azucares reductores en la meladura clarificada y meladura concentrada.

Numero muestra	Azucares reductores promedio Meladura Clarificada	Azucares reductores promedio Meladura Concentrada
1	1,6790	1,8814
2	1,7378	1,9239
3	1,6949	2,1405
4	1,8663	1,9303
5	1,6852	1,9778
6	1,8972	1,9239
7	1,7251	1,9992
8	1,7575	1,9510
9	1,8563	1,9380
10	1,7532	2,1090

En el gráfico 18 se puede observar el comportamiento de los azúcares reductores en la toma de 30 muestras, durante 10 días, esta tabulación completa se encuentra en el anexo H allí se ilustran las 30 muestras con su respectiva tabulación, donde se podrá tener un concepto más particular acerca del material estudiado. En el anexo I se encuentra una gráfica de variación de los azúcares reductores, para esclarecer el análisis. Como se puede observar, no hay una relación directa y proporcional entre el porcentaje de azúcares reductores de la meladura clarificada con el porcentaje de azúcares reductores en la meladura concentrada, esto es dado por varios factores que se deben de considerar en el momento del análisis de los datos obtenidos:

- En la caña, el agua representa entre 73% y 76%. Los sólidos totales solubles (brix) varían entre 10% y 16% y la fibra oscila entre 11% y 16%. Entre los azúcares más sencillos se encuentran la glucosa y la fructuosa (azúcares reductores), que existen en el jugo de cañas maduras en una concentración entre 1% y 5%, por este motivo es de importante tener un control absoluto sobre todo el proceso de fabricación, ya que estos datos de la materia prima afectan la producción de azúcar, y de ser obviada su toma, se tendrán problemas al momento de registrar la eficiencia de cada lote y tipo de caña.
- La calidad del azúcar crudo y de otros productos, dependen en gran parte, de la proporción de estos azúcares reductores, los cuales cuando aumentan por causa de deterioro o falta de maduración de la planta, pueden producir incrementos en el color y el grano defectuoso. Esta situación se presenta con frecuencia, durante largo tiempo de residencia de la caña en los patios, donde se encuentra expuesta al sol y la lluvia, sin tener en cuenta que estos dos factores facilitan la formación de azúcares reductores en la planta que no ha comenzado a ser tratada para el proceso de fabricación.
- Para evaluar con un criterio argumentativo, en primera instancia se debe tener conocimiento del tipo de caña que se está usando en el proceso de elaboración, ya que se debe conocer las deficiencias y fortalezas del cultivo de caña, dado a que cuando se presentan deficiencias de un nutriente, como el potasio, el porcentaje de sacarosa se reduce y los niveles de azúcares reductores se incrementan, lo cual resulta en bajo rendimiento y en la presencia de altas cantidades de materiales coloreados debido a la descomposición térmica de los azúcares reductores o a las reacciones de Maillard antes mencionadas.

- Las disminuciones en los niveles de sacarosa están acompañadas por el incremento en los azúcares reductores y descensos en el pH de los jugos, que de no ser tratado correctamente en la etapa de clarificación de jugo, llegara a su etapa de evaporación con tendencia a la formación de color generado por las reacciones de Maillard, como se menciono anteriormente, afectando directamente la clarificación de meladura que pretende disminuir el color y mejorar la calidad del material para la obtención de un producto final en optimas condiciones.

Para corroborar este último punto en la discusión de los resultados de azúcares reductores en la meladura concentrada, se expone el siguiente grafico:

Grafico 19. Variacion entre el pH y el porcentaje de azúcares reductores en la meladura concentrada.

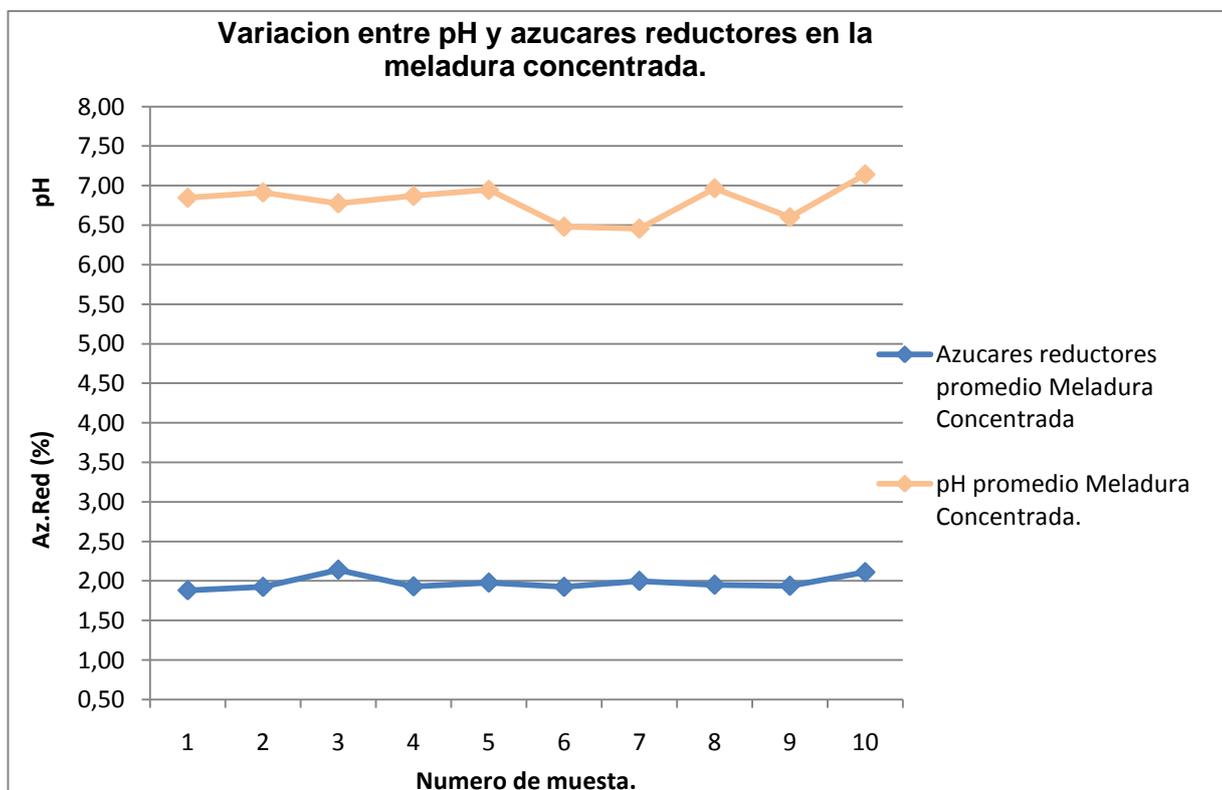


Tabla 16. Datos correspondientes a la correlación entre el pH y azúcares reductores en la meladura concentrada.

Numero de muestra.	Azúcares reductores promedio Meladura Concentrada	pH promedio Meladura Concentrada.
1	1,88	6,85
2	1,92	6,91
3	2,14	6,78
4	1,93	6,87
5	1,98	6,95
6	1,92	6,48
7	2,00	6,46
8	1,95	6,97
9	1,94	6,60
10	2,11	7,14

Estadísticos descriptivos

Tabla 17. Estadísticos descriptivos de los Azúcares Reductores en la meladura clarificada y meladura concentrada.

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.	Varianza	C.V (%)
Azúcares Reductores Meladura Clarificada	30	1,27	1,93	1,7653	,15142	,023	8.578
Azúcares Reductores Meladura Concentrada	30	1,78	2,34	1,9775	,11181	,013	5.654
N válido (según lista)	30						

14.9 CONTENIDO DE FOSFATOS EN LA MELADURA:

En el proceso de producción de azúcar, el contenido de fosfatos es muy importante dado que se debe mantener un nivel de ellos en el jugo para poder lograr su correcta clarificación. Esto con el fin de se formen fácilmente los fosfatos tricálcico y se produzca una floculación más eficiente. Al terminar esta etapa de clarificación de jugo, Es importante que el contenido de fosfatos sea mantenido a un mínimo de 300 ppm.

Honig (1960) considera que la cantidad de fosfatos presente en el jugo de la caña es importante durante el proceso de clarificación, ya que se acepta que para una buena floculación después del encalamiento y de la adición de poliacrilamidas (floculantes), las concentraciones de fósforo en el jugo deben estar entre 300 y 600mg/L de P_2O_5 . El fósforo, en forma de fosfatos solubles, además de ser un elemento clave para el crecimiento y desarrollo del cultivo, es también de gran utilidad en el procesamiento y recuperación de azúcar de buena calidad³¹.

Al finalizar esta etapa de clarificación de jugo, el material es sometido a una última operación de clarificación donde se eliminan las impurezas remanentes, pero la real importancia es el tiempo de residencia para tener un proceso exitoso, la clarificación de meladura se encuentra reflejada en dos etapas principales, la primera la correcta mezcla y contacto de los reactivos de clarificación (fosfatos y sacarato) con la meladura de tal forma que posibilite la floculación primaria, y de igual forma posibilite el buen contacto del floculante que induce la floculación secundaria. La segunda etapa es la separación de los flóculos secundarios de la meladura, para obtener finalmente una meladura clarificada de óptima calidad.

Si la dosis de ácido fosfórico que se le adiciona a la meladura cruda es incorrecta, se puede generar una formación incompleta de flóculos ya que la reacción de la cal con los fosfatos presentes depende de la temperatura a la que se somete el material. Cuando la temperatura de la meladura está por debajo del punto de ebullición la clarificación no se efectúa de manera correcta, y esto genera una meladura clarificada de alta turbiedad y alto contenido en fosfatos, lo cual no es conveniente, dado a que en varias ocasiones esta meladura después de ser concentrada, puede ser considerada como miel virgen que se utiliza como materia prima en la fabricación de varios productos comerciales, por ejemplo en la elaboración de licor, donde el contenido alto de fosfatos impide que se dé la obtención.

Para fin de la investigación, se realizó una serie de 6 muestreos donde se corrobora que la dosificación de ácido fosfórico (maxiphost) si es la adecuada

³¹ LA calidad de la caña de azúcar. Jesús Larrahondo. Cenicaña.

para la clarificación, esta prueba se realizo tomando una muestra por día, localizando el evaporador que estaba siendo utilizado como descargue de meladura cruda al clarificador (primer punto de muestreo), punto de adición de la fuente de fosfatos (segundo punto de muestreo), finalizando con el material tratado, meladura clarificada (tercer punto de muestreo), de esta manera también se tuvo en cuenta, el flujo de floculante dosificado, flujo de meladura cruda al clarificador, así mismo la turbiedad, pH y grados brix, para cada material muestreado, a continuación se presenta la tabulación de los resultados de estas pruebas:

Prueba N° 1 (19 junio 2009)

Flujo de meladura al clarificador = 67.4 m³/h

Flujo de floculante = 13 L/min

	Evaporador 6	Meladura cruda	Meladura Clarificada
Turbiedad (NTU)	63,9	117	41,6
pH	6,45	6,34	7,65
° Brix	57,01	55,3	50,03
ppm PO ₄ ⁻³	83,68	95,55	29,71

Prueba N° 2 (20 junio 2009)

Flujo de meladura al clarificador = 63.5-64 m³/h

Flujo de floculante = 16-18 L/min

	Evaporador 5	Meladura cruda	Meladura Clarificada
Turbiedad (NTU)	80,6	185	52
pH	6,19	7,67	6,66
° Brix	50,38	49,36	49,63
ppm PO ₄ ⁻³	129,27	164,69	43,34

Prueba N° 3 (22 junio 2009)

Flujo de meladura al clarificador = 66 m³/h

Flujo de floculante = 12 L/min

	Evaporador 5	Meladura cruda	Meladura Clarificada
Turbiedad (NTU)	78,96	146	31
pH	6,2	7,58	6,46
° Brix	58,98	55,77	54,60
ppm PO ₄ ⁻³	75,69	89,46	46,23

Prueba N° 4 (23 junio 2009)

Flujo de meladura al clarificador = 64,5 m³/h

Flujo de floculante = 15 L/min

	Evaporador 6	Meladura cruda	Meladura Clarificada
Turbiedad (NTU)	80,59	134	53,1
pH	6,18	7,67	6,94
° Brix	53,98	52,02	49,96
ppm PO ₄ ⁻³	90,36	126,06	54,79

Prueba N° 5 (24 junio 2009)

Flujo de meladura al clarificador = 69,4 m³/h

Flujo de floculante = 13.7 L/min

	Evaporador 5	Meladura cruda	Meladura Clarificada
Turbiedad (NTU)	46.96	58.1	36
pH	6,32	6.40	6.48
° Brix	46.96	44.46	43.21
ppm PO ₄ ⁻³	79.36	89.73	49.11

Prueba N° 6 (25 junio 2009)

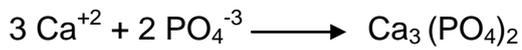
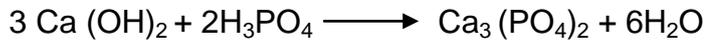
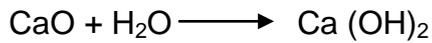
Flujo de meladura al clarificador = 66 m³/h

Flujo de floculante = 10 L/min

	Evaporador 6	Meladura cruda	Meladura Clarificada
Turbiedad (NTU)	106.23	130	28.6
pH	6.05	7.62	6.54
° Brix	47.69	46.74	51.33
ppm PO ₄ ⁻³	86.56	118.56	29.69

Como se puede observar, en las anteriores pruebas, tanto el flujo de meladura al clarificador, el flujo de floculante y la cantidad de fosfatos presentes en la meladura en cada punto de muestreo es muy variable, por lo que al representarse de manera grafica, se observa que la cantidad de fosfatos presentes en la meladura tomada del evaporador (independiente si es el evaporador 5 o 6) es proporcional a la cantidad de los fosfatos hallados en la meladura cruda tomada del tanque de reacción, siendo los mayores valores determinados durante la investigación, así mismo se contempla como los fosfatos de la meladura clarificada se encuentra en el rango de 29,69-54,79 ppm PO₄⁻³, dando a conocer que la remoción del mismo fue significativa

durante el proceso, que es lo primordial en esta etapa de clarificación ya que como se ha mencionado anteriormente, las reacciones que ocurren son las siguientes:



Es por ello que la cantidad de ácido fosfórico y cal es muy importante para el proceso, ya que estas determinan la formación del fosfato tricálcico que genera la floculación primaria. Para que el contenido de fosfatos sea el indicado, se debe tener en cuenta el flujo de sacarato de cal y de la fuente de fosfatos empleada, que debe ser calculado según el flujo de meladura cruda que llega al clarificador. Como para el sacarato de cal no se cuenta con un medidor de flujo, ni se tiene completa certeza de la composición del mismo se hace que este control sea complicado para el operador, por lo tanto solo se controla el flujo de ácido fosfórico empleado, para esto en el anexo B, se encuentra una tabulación donde se relaciona el flujo de meladura con el flujo de ácido fosfórico a dosificar, para ello en el anexo B.1 se enseña el aforo a la bomba dosificadora del producto para facilitar el manejo del operador.

Grafico 20. Seguimiento al contenido de fosfatos en la meladura.

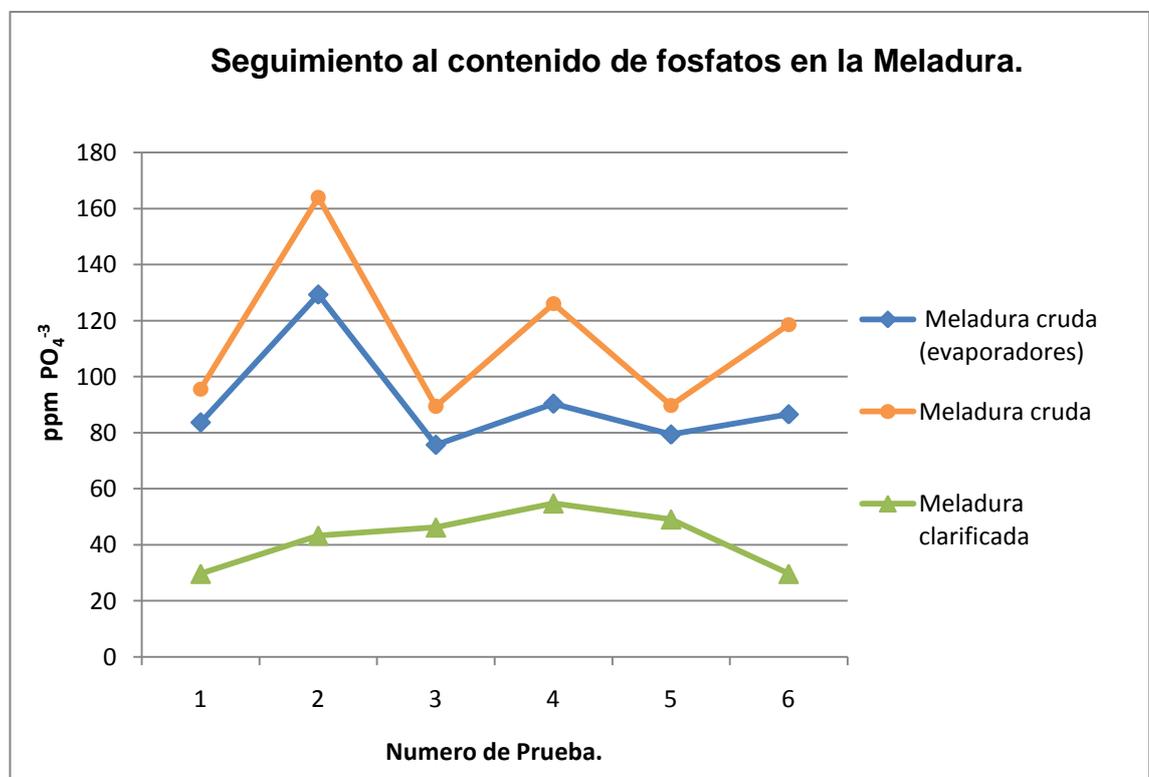


Tabla 18. Datos correspondientes al seguimiento del contenido de fosfatos en la meladura.

Numero de Prueba	Evaporadores (ppm PO ₄ ⁻³)	Meladura cruda (ppm PO ₄ ⁻³)	Meladura clarificada (ppm PO ₄ ⁻³)
1	83,68	95,55	29,71
2	129,27	164	43,34
3	75,69	89,46	46,23
4	90,36	126,06	54,79
5	79,36	89,73	49,11
6	86,56	118,56	29,69

El fósforo es el segundo elemento más importante en el crecimiento de la caña. Generalmente el fósforo es usado en las plantas para producir ácidos nucleicos y almacenamiento de energía de los componentes, como lo es el adenosín trifosfato (ATP). El ATP es llamado la fuente eléctrica de la planta, porque es usada para guardar energía en las células de la caña.³²

La fosflotación es un proceso de clarificación de licores azucarados mediante la flotación de flocos de fosfato tricálcico en el líquido los cuales atrapan los sólidos insolubles, la materia coloidal, las sustancias colorantes y los constituyentes de las cenizas. El licor azucarado es aireado mediante la disolución de aire por presurización, tratado con ácido fosfórico y cal para formar un precipitado floculento de fosfato tricálcico y despresurizado para permitir el escape del aire disuelto en forma de burbujas pequeñísimas. Los flocos atrapan las burbujas de aire formando un coágulo que ocluye o adsorbe sólidos e impurezas en su ascenso a la superficie del licor. Allí forman una nata espumosa mientras la meladura clarificada es retirada como un flujo inferior. El proceso debe ser manejado dentro de parámetros técnicos y económicos los cuales determinan la calidad del licor clarificado obtenido y los valores de operación de las principales variables de control del proceso: la razón aire/sólidos y la viscosidad del licor.

En la clarificación de la meladura y del jugo la presencia de un nivel adecuado de fosfórico expresado como anhídrido fosfórico (P₂O₅) disponible en el material, es sumamente importante.

Es bien conocido que la precipitación del fosfato de cal es la reacción más importante en la clarificación, por ello el contenido de P₂O₅ en el jugo mezclado y en la meladura, es un factor predominante en la clarificación.

Normalmente el contenido de fosfatos en la meladura es pequeño, dado a que el material ha sido clarificado anteriormente (clarificación de jugo), de ahí la

³² Beet-Sugar Handbook. página 69.

práctica de añadir ácido fosfórico para aumentar el nivel mínimo necesario para la buena clarificación. Esto varía con la variedad de caña, fertilizante, zonas climáticas, tipos de suelos, etc.

El fosfórico añadido al jugo o meladura puede ser en forma de ácido fosfórico (H_3PO_4), fosfato monocálcico ($Ca (H_2PO_4)_2 \cdot H_2O$), o fosfato tricálcico ($Ca_3 (PO_4)_2$). El ácido fosfórico comercial tiene usualmente 54.73 % de P_2O_5 , y los dos últimos alrededor de 45-48%.

La aplicación del fosfórico debe hacerse siempre en solución con agua (aproximadamente 50%) para controlar mejor la dosificación. Debe usarse una pequeña bomba dosificadora que permita una aplicación continua y variaciones en la dosificación.

Es muy importante recordar que la aplicación del ácido fosfórico debe hacerse antes de la aplicación de la cal y nunca después de la cal, dado a que en el momento de adicionarse el H_3PO_4 el material sufre una disminución en el pH, lo cual se nivela a pH 6,8-7,1 con la cal suministrada al sistema.

La forma práctica y correcta de aplicar el ácido fosfórico consiste en analizar la meladura cruda tomada de un evaporador, para determinar su contenido de P_2O_5 , y calcular cual deberá ser la dosificación necesaria para elevar el P_2O_5 al nivel mínimo de 300 ppm.

Una dosificación muy alta de ácido fosfórico es perjudicial ya que en concentraciones de 0.06% a 0.08% (600-800ppm) forma flóculos muy pequeños de poca cohesión, que se tornan ligeros y al suministrarles aire no ascienden muy lentamente para la formación de la torta, lo cual no es conveniente por que se pasan flóculos del clarificador al recibidor de meladura clarificada.

Las ventajas que se obtienen con la aplicación de fosfórico son:

- a) Meladura más clara
- b) Mayor velocidad de formación de cachaza o torta (fosflotación)
- c) Cachaza más concentrada
- d) Mayor filtración y agotamiento de la cachaza
- e) Mayor facilidad en el trabajo de los tachos de agotamiento.
- f) Menor color en el azúcar
- g) Azúcar comercial de mejor calidad.

En los casos de los jugos refractarios, cañas inmaduras, exceso de materias extrañas, etc., el uso del ácido fosfórico es indispensable para mejorar la clarificación.

Los floculantes y el ácido fosfórico son dos auxiliares muy efectivos en el proceso de la clarificación, siempre que se usen correctamente.

Es por ello que el contenido de fósforo es importante en la caña y en la producción de azúcar. A continuación se expone la variación de los fosfatos en la meladura cruda y en la meladura clarificada, mostrándonos en el Grafico 20, que la cantidad de fosfatos en la meladura clarificada, es significativamente menor a la cantidad de fosfatos presentes en la meladura cruda, lo cual indica que la formación del fosfato tricálcico (floculación primaria), y su reacción con el floculante adicionado (flóculos secundarios), genera una capa característica de impurezas que permite la remoción de la misma dada su consistencia.

En el anexo J se presentan los gráficos de control del proceso para la meladura clarificada, con su respectiva tabulación del tratamiento estadístico realizado, de la meladura clarificada y cruda, también se encuentra en el anexo L la correlación o comportamiento entre el porcentaje de remoción, la cantidad de fosfatos iniciales, y finales, de un total de 20 muestras, donde se muestra que la cantidad de fosfato expresado como P_2O_5 se encuentra en un amplio rango de 10,87-51,90 ppm P_2O_5 , y en estos mismos casos el porcentaje de remoción está en un rango de 17,57-80,64 %.

Grafico 21. Variación de los fosfatos en la meladura cruda y en la meladura clarificada.

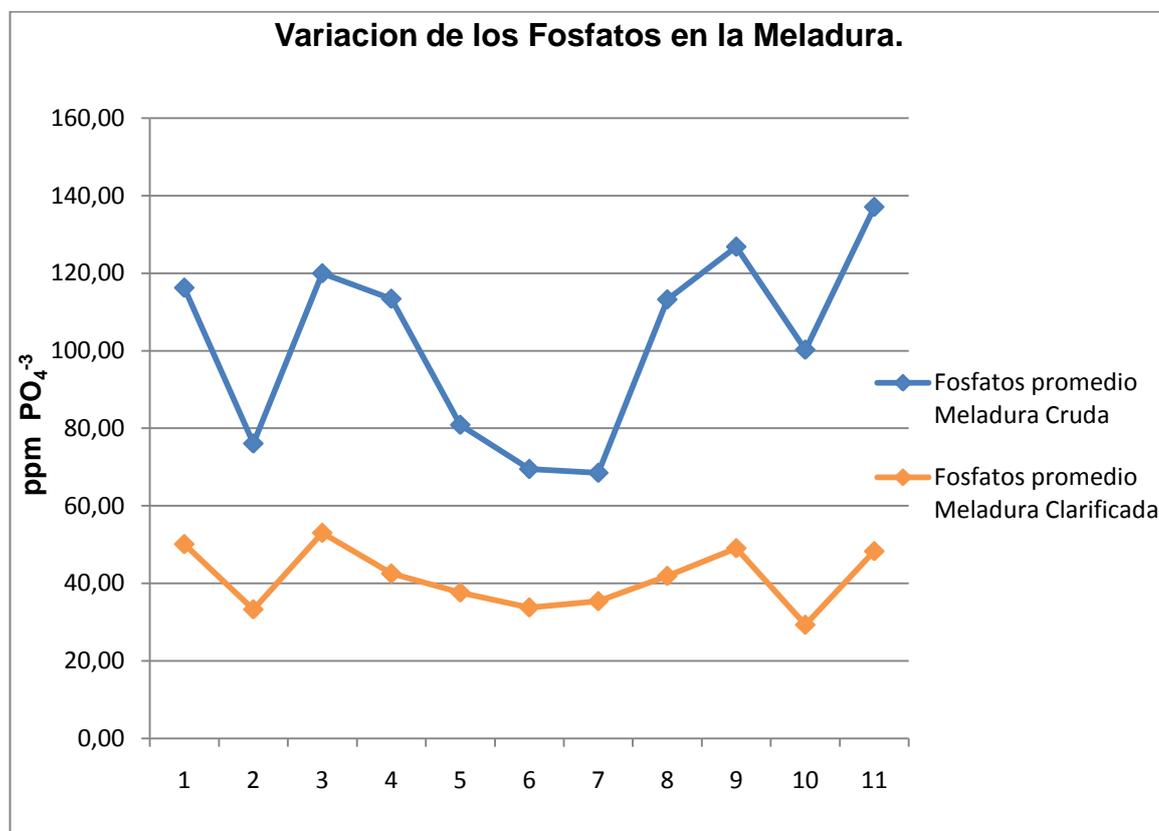


Tabla 19. Datos correspondientes a la variación de los fosfatos en la meladura cruda y clarificada.

Numero de muestra	Fosfatos promedio Meladura Cruda	Fosfatos promedio Meladura Clarificada
1	116,24	50,13
2	76,07	33,25
3	119,96	53,04
4	113,39	42,52
5	80,88	37,61
6	69,49	33,75
7	68,52	35,37
8	113,23	41,91
9	126,83	49,08
10	100,25	29,27
11	137,08	48,30

La formación de los flóculos depende fundamentalmente del tratamiento previo de la meladura, es decir del pH y la temperatura. El clarificador no forma flóculos de por sí, sino que su función es mantener la meladura en reposo lo mas que se pueda, con un movimiento casi nulo que se realiza en el momento de la remoción de la torta o cachaza, logrando una separación de la meladura y sus impurezas produciendo un material clarificado. Cuando no se logra una meladura aceptable, la primera acción, debe ser la revisión y modificación dentro de límites razonables de los variables pH y temperatura.

Los materiales auxiliares como el acido fosfórico y floculantes son para mejorar la formación de flóculos, y consecuentemente la clarificación. En caso de dificultades en la clarificación se debe revisar y variar las dosificaciones dentro de límites razonables.

Lo importante a recordar cuando se presentan dificultades en la clarificación, como en los casos de clarificadores revueltos, es que las soluciones posibles tienen que tomar en cuenta el conjunto de factores que intervienen en el tratamiento previo de la meladura y además en la operación del clarificador.

Con la clarificación de meladura por flotación el Ingenio ha logrado obtener una mejor calidad de azúcar, ofreciendo a los consumidores un producto con menor contenido de azufre, cenizas, color y turbiedad. Además de obtener azúcar de mejor calidad, este sistema ha permitido aumentar la eficiencia en la casa de elaboración y la capacidad de tachos, cristalizadoras y centrifugas, beneficios logrados por estar haciéndose los cocimientos con materiales más limpios y de mayor pureza

En la industria azucarera, el aspecto de las características hidráulicas de los clarificadores flotadores, no es prácticamente tomado en cuenta en la evaluación de la eficiencia de estos equipos, debido a que existe muy poca información al respecto, Por tanto, actualmente, para evaluar estos equipos se analiza fundamentalmente la brillantez, transparencia y % de azúcares reductores del líquido clarificado³³.

Estadísticos descriptivos

Tabla 20. Estadísticos descriptivos de los fosfatos en la meladura.

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.	Varianza	C.V (%)
Fosfatos en Meladura Cruda	33	46,30	198,05	101,9936	38,00796	1444,605	37.27
Fosfatos en Meladura Clarificada	33	14,55	69,45	41,2930	14,52777	211,056	35.18
N válido	33						

Correlaciones de Pearson.

Tabla 21. Correlaciones de Pearson en la meladura clarificada.

		Turbiedad (NTU)	pH	°Brix	Fosfatos
Turbiedad (NTU)	Correlación de Pearson	1	,011	-,231	,256
	Sig. (bilateral)	.	,950	,197	,151
	N	33	33	33	33
pH	Correlación de Pearson	,011	1	-,232	-,519(**)
	Sig. (bilateral)	,950	.	,193	,002
	N	33	33	33	33
°Brix	Correlación de Pearson	-,231	-,232	1	,084
	Sig. (bilateral)	,197	,193	.	,641
	N	33	33	33	33
Fosfatos	Correlación de Pearson	,256	-,519(**)	,084	1
	Sig. (bilateral)	,151	,002	,641	.
	N	33	33	33	33

**la correlación es significativa al nivel 0.01 (bilateral)

³³ **Análisis del comportamiento hidrodinámico de Un clarificador de licores azucarados.**
Mayra Cordovés Macías, Cándida Díaz Ramírez, Emilio Díaz García
Instituto superior politécnico "José Antonio Echeverría", ispjae

El coeficiente de correlación de Pearson es un índice estadístico que mide la relación lineal entre dos variables cuantitativas. A diferencia de la covarianza, la correlación de Pearson es independiente de la escala de medida de las variables.

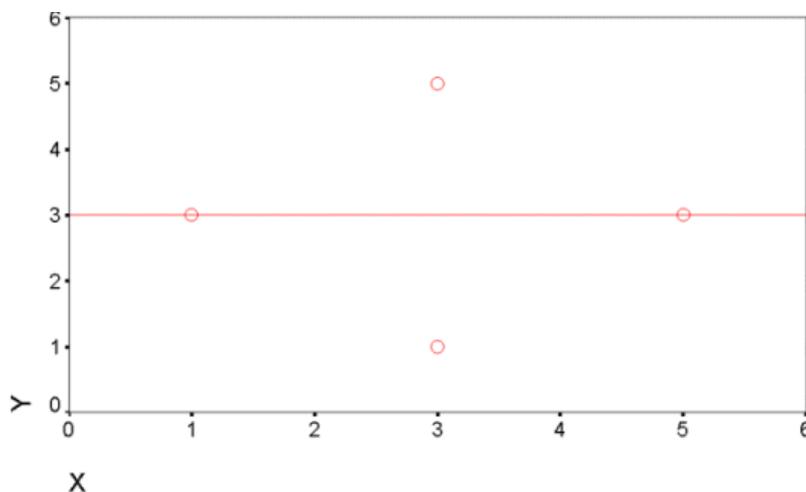
La correlación entre dos variables refleja el grado en que las puntuaciones están asociadas. La formulación clásica, conocida como correlación producto momento de Pearson, se simboliza por la letra griega rho (γ_{xy}) cuando ha sido calculada en la población. Si se obtiene sobre una muestra, se designa por la letra "r_{xy}". Este tipo de estadístico puede utilizarse para medir el grado de relación de dos variables si ambas utilizan una escala de medida a nivel de intervalo/razón (variables cuantitativas).

Como se puede observar en la tabla 21 las correlaciones de Pearson indican que existe una relación entre los fosfatos y el pH del material, y que este es independiente de la turbiedad y los grados brix, esto se pudo determinar ya que la prueba bilateral (de dos colas), con un nivel de significatividad de 0,01, arroja un valor de correlación entre el pH y los fosfatos de 0.002, es menor al nivel de significatividad establecido en la evaluación de la correlación, generando un coeficiente de Pearson de -0,519, lo cual es lo correcto, ya que este índice de correlación varía en el intervalo de [-1,1]

El valor del índice de correlación varía en el intervalo [-1, +1]:

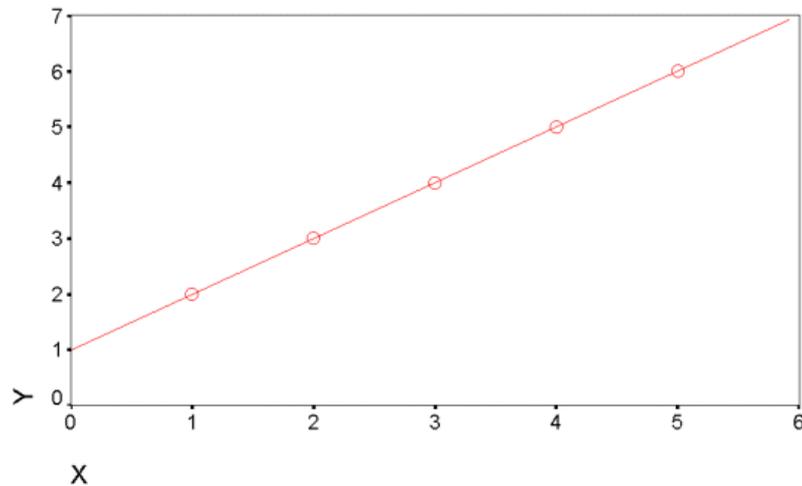
- a) Si $r = 0$, no existe relación lineal. Una correlación de 0 se interpreta como la no existencia de una relación lineal entre las dos variables estudiadas. Pero esto no necesariamente implica una independencia total entre las dos variables, es decir, que la variación de una de ellas puede influir en el valor que pueda tomar la otra. Pudiendo haber relaciones no lineales entre las dos variables. Estas pueden calcularse con la razón de correlación.

Figura 25. Grafico de correlación de Pearson, con $r = 0$ entre dos variables.



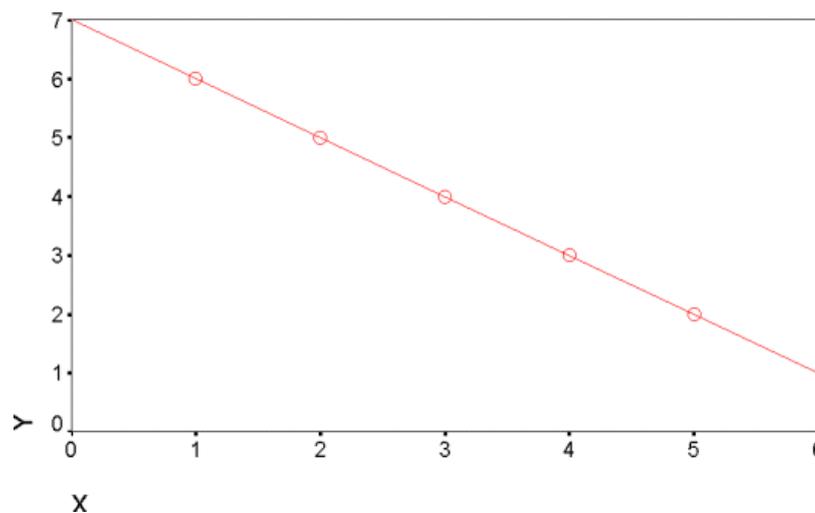
- b) Si $r = 1$, existe una correlación positiva perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables denominada *relación directa*: cuando una de ellas aumenta, la otra también lo hace en idéntica proporción. Es decir, las puntuaciones bajas de la primera variable (X) se asocian con las puntuaciones bajas de la segunda variable (Y), mientras las puntuaciones altas de X se asocian con los valores altos de la variable Y.

Figura 26. Grafico de correlación de Pearson, $r=1$ entre dos variables.



- c) Si $0 < r < 1$, existe una correlación positiva.
- d) Si $r = -1$, existe una correlación negativa perfecta. El índice indica una dependencia total entre las dos variables llamada *relación inversa*: cuando una de ellas aumenta, la otra disminuye en idéntica proporción.

Figura 27. Grafico de correlación de Pearson, $r = -1$ para dos variables.



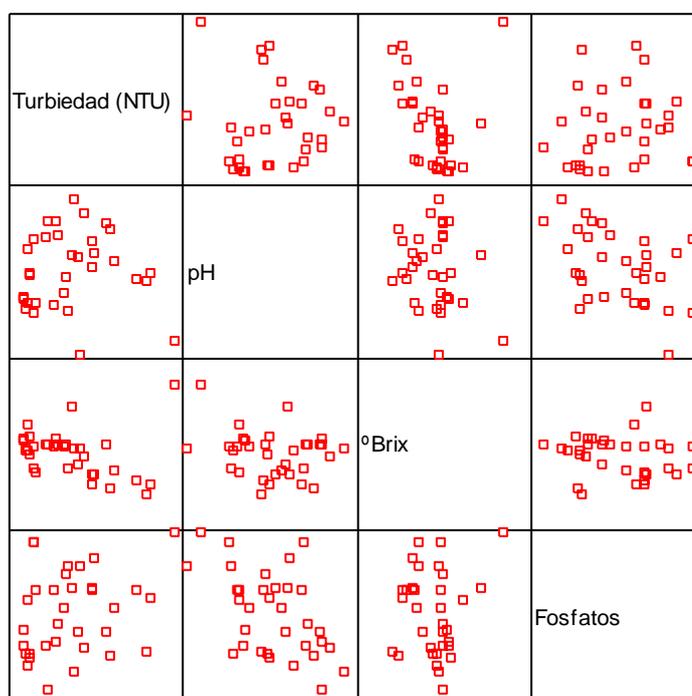
- e) Si $-1 < r < 0$, existe una correlación negativa.

Como se ha indicado el coeficiente de correlación de Pearson es un índice cuyos valores absolutos oscilan entre 0 y 1. Cuanto más cerca de 1 mayor ser la correlación, y menor cuanto más cerca de cero.

Un coeficiente de correlación se dice que es significativo si se puede afirmar, con una cierta probabilidad, que es diferente de cero. Más estrictamente, en términos estadísticos, preguntarse por la significación de un cierto coeficiente de correlación no es otra cosa que preguntarse por la probabilidad de que tal coeficiente proceda de una población cuyo valor sea de cero.

A este respecto, se elabora primeramente el diagrama de dispersión, que nos dará cuenta de la adecuación del coeficiente lineal de Pearson.

Grafico 22. Grafico de dispersión matricial



Un Diagrama Matricial proporciona información sobre la existencia e intensidad de las relaciones entre diversos aspectos relacionados con un tema en estudio. Esta información da una visión global muy completa sobre dicho tema, y permite tener en cuenta las implicaciones derivadas de la acción sobre cualquiera de los elementos implicados en el mismo.

Debido a las características principales del Diagrama Matricial su construcción es útil cuando:

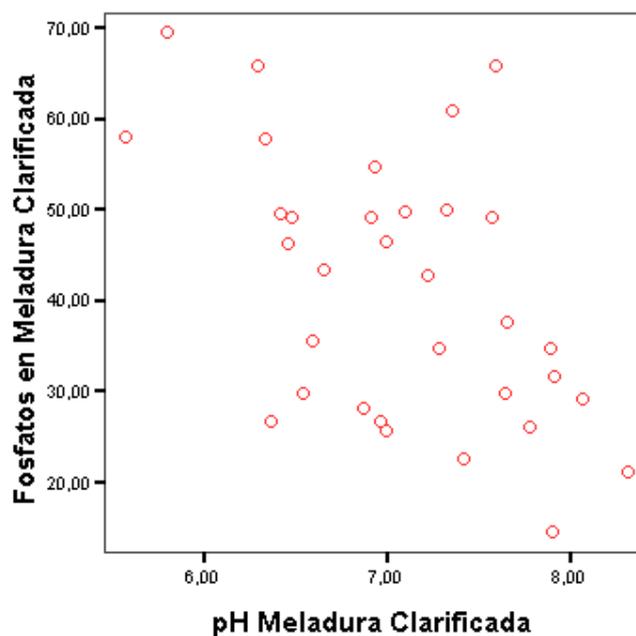
- Es necesario recoger en un estudio, diferentes puntos de vista sobre el mismo tema.
- Se requiere información simultánea sobre relaciones de factores implicados en dicho tema.

Como consecuencia de los dos puntos anteriores se puede decir que es una herramienta útil para cualquier acción de planificación³⁴.

Dicho lo anterior, se puede analizar el grafico N°...de dispersión matricial, como se puede observar el grafico muestra una tendencia de los datos con pendiente negativa, lo que se llama, una relación perfecta negativa, que se da cuando exactamente en la medida que aumenta una variable disminuye la otra.

Como anteriormente se definió, existe una correlación negativa perfecta entre el pH y los fosfatos de la meladura, esta afirmación se confirma con el grafico de dispersión matricial, aunque el coeficiente de correlación de Pearson, pensado para variables cuantitativas (escala mínima de intervalo), es un índice que mide el grado de covariación entre distintas variables relacionadas linealmente. Adviértase que se dice: "variables relacionadas linealmente", esto significa que puede haber variables fuertemente relacionadas, pero no de forma lineal, en cuyo caso no proceder a aplicarse la correlación de Pearson.

Grafico 23. Diagrama de dispersión interactivo de dos variables.



³⁴ Diagrama matricial. http://www.fundibeq.org/metodologias/herramientas/diagrama_matricial.pdf

Capacidad de proceso y de maquinas:

Para el respectivo análisis de capacidad de proceso y maquinas, se emplearon todos los datos que se obtuvieron en la investigación.

Se tomara una tolerancia de ± 10 ppm P_2O_5 dado a que la mayoría de los datos se encuentran dentro de este rango, y el proceso muestra una fluctuación de esta cantidad. Elaborado el grafico de control de los fosfatos (expresados como P_2O_5) en la meladura clarificada ubicado en el anexo J, el valor medio de este muestreo es de $\bar{X} = 30,86\%$, por tanto se fijaran los límites de tolerancia inferior (LTI) y límite de tolerancia superior (LTS), para conocer si el proceso tiene una alta capacidad para originar productos de forma estable que se encuentren dentro de los limites de tolerancia.

Valor medio: $\bar{X} = 30,86$

Límite superior de tolerancia $LST = 30,86 + 10 = 40,86$

Límite Inferior de Tolerancia $LIT = 30,86 - 10 = 20,86$

Desviación estándar: $\sigma = 10,86$

Haciendo uso de la siguiente formula, se determina la capacidad de proceso:

$$Cp = \frac{LTS - LTI}{6\sigma}$$

$Cp = 0,3069 \leq 1,33$

Como el valor obtenido para la capacidad de proceso es menor a 1,33, se deben Aplicar medidas correctoras con el fin de disminuir la desviación típica y ajustar el proceso a los límites tolerables.

En el anexo K, se encuentran tabulados todos los datos que se usaron para la determinación de esta capacidad de proceso, con su respectivo tratamiento estadístico.

14.10 PORCENTAJE DE SÓLIDOS SEDIMENTABLES EN FASE HÚMEDA EN LA MELADURA.

Los sólidos sedimentables están formados por partículas más densas que la solución madre que los contiene, que se mantienen dispersas dentro de ella en virtud de la fuerza de arrastre causada por el movimiento o turbulencia de la corriente. Por esta razón, sedimentan rápidamente por la acción de la gravedad, cuando la solución madre se mantiene en reposo.

Cuanto mayor es la turbulencia de la solución, mayor es su contenido de sólidos sedimentables y mayor también, el tamaño y la densidad de las partículas que son arrastradas por la solución.

De esta manera, los sólidos sedimentables son una medida directa de la turbulencia del cuerpo de la solución de donde proceden las muestras.

Durante el proceso de elaboración de azúcar, es muy importante mantener un porcentaje de sólidos bajo, ya que esto afecta la calidad del producto final, es por ello que el objetivo de esta determinación es hallar la cantidad de sólidos sedimentables que posee la meladura clarificada y concentrada, ya que en el momento de la producción, se presenta cantidad significativa de puntos negros (principalmente) en el producto final, dado a que en los evaporadores se generan incrustaciones por la cantidad de cal que contiene el material que se va adhiriendo a las paredes de estos, generando un arrastre de sólidos que se ve reflejado en el producto final.

Para fin de la investigación y análisis, en primera medida se explicara de manera general el funcionamiento del múltiple efecto al cual se somete el material.

Funcionamiento de un múltiple efecto³⁵

El progreso más notable y más importante en la historia de la fabricación de azúcar es sin duda el descubrimiento del efecto hecho alrededor de 1830, en Luisiana, por Nobert Rillieux, americano de origen francés.

La idea de Rillieux fue la siguiente: Ya que es con vapor con lo que se calienta el jugo para elaborar el agua que contiene, ¿Por qué no es posible utilizar el vapor así producido por el jugo para calentar otra fracción del mismo o para terminar la evaporación iniciada con vapor ordinario?

³⁵ Seguimiento de las variables fisicoquímicas del clarificador SRI y verificación de la eficiencia del tachó continuo Fletcher Smith para la optimización de la elaboración de azúcar en el ingenio Risaralda. Página 102.

Al resolver este problema se encontró inmediatamente con el siguiente obstáculo: Con vapor de 110 °C es posible calentar y evaporar jugo a la presión atmosférica. La temperatura del vapor del jugo, hirviendo a la presión atmosférica es 100°C. Así con vapor de 100°C de temperatura no es posible hacer hervir jugo a 100°C; es necesaria una diferencia de temperatura entre el fluido que calienta y el fluido calentado. Rillieux resolvió la dificultad poniendo al vacío el o los cuerpos siguientes al primero. El agua o el jugo hierven a 90°C a 23 cm de vacío; a 80°C a 40cm de vacío, a 70°C a 52cm de vacío, etc.; es posible entonces crear la diferencia de temperatura necesaria y utilizar el vapor del jugo producido por el primer cuerpo, para calentar el jugo encerrado en el segundo; el vapor de este para calentar el tercero y así sucesivamente. Es por esto que la ebullición al vacío tiene las siguientes ventajas:

- Aumenta la diferencia total de temperatura entre vapor y jugo en una cantidad igual a la caída del punto de ebullición del jugo entre la presión del primer cuerpo y la del último.
- Permite continuar la evaporación a temperaturas menos peligrosas desde el punto de vista de la inversión y de la coloración del jugo, cuando el jugo está más concentrado y más viscoso.

A continuación se muestra una descripción general de la distribución de los evaporadores en el Ingenio Risaralda S.A, con sus respectivos cambios de temperatura, presión y brix de cada efecto.

Figura 28. Distribucion general del proceso de evaporacion

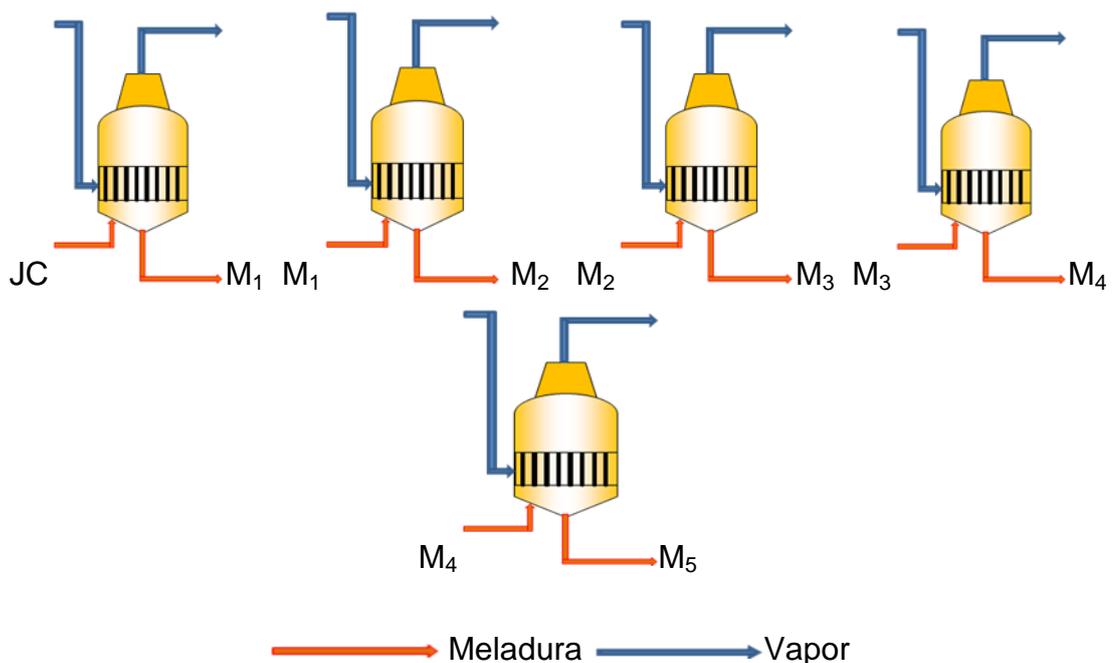


Tabla 22. Cambios de temperatura, presión y brix de cada efecto del proceso de evaporación

Primer Efecto					
Brix JC	Brix M1	Temperatura del vapor ₁	Presión del vapor ₁	Temperatura del vapor ₂	Presión del vapor ₂
14	25,5	120 °C	33,33 psia	114 °C	24,33 psia

Segundo Efecto					
Brix M1	Brix M2	Temperatura del vapor ₁	Presión del vapor ₁	Temperatura del vapor ₂	Presión del vapor ₂
25,5	32	114 °C	24,33 psia	111 °C	21,33 psia

Tercer Efecto					
Brix M2	Brix M3	Temperatura del vapor ₁	Presión del vapor ₁	Temperatura del vapor ₂	Presión del vapor ₂
32	46	111 °C	21,33 psia	95,8 °C	13,84 psia

Cuarto Efecto					
Brix M3	Brix M4	Temperatura del vapor ₁	Presión del vapor ₁	Temperatura del vapor ₂	Presión del vapor ₂
46	53	95,8 °C	13,84 psia	85 °C	8,4 psia

Quinto Efecto					
Brix M4	Brix M5	Temperatura del vapor ₁	Presión del vapor ₁	Temperatura del vapor ₂	Presión del vapor ₂
53	70	85 °C	8,4 psia	64 °C	3,5 psia

Este proceso se repite en la misma proporción hasta el último evaporador, el cual, por tener tan poco poder calórico, necesita de presiones muy pequeñas para lograr el efecto, entonces en este evaporador se trabaja al vacío.

En este proceso se miden tres variables independientes que son: vacío, niveles y temperaturas. Los efectos de las variaciones de estas variables son aumento en el tiempo de evaporación, destrucción de azúcares reductores y por lo tanto pérdidas de sacarosa.

De este proceso sale la meladura, que es el mismo jugo clarificado pero con 75% menos de agua.

La meladura clarificada y concentrada va a los tachos, los cuales son tanques donde se lleva a cabo la cristalización. Esta se dirige inicialmente al primer tacho (Tacho A) en donde se deposita un 70% de meladura y un 30% de semilla (la semilla es un cristal de azúcar muy fino que se alimenta de sacarosa presente en la meladura, enriqueciendo el tamaño del grano). Del tacho A sale una masa compuesta de miel y cristales, la cual es llevada a un proceso de centrifugación, en donde se le agrega agua para diluir la miel impregnada en el grano, obteniéndose al final azúcar cristalizada y miel (miel A). Esta última posee aún un alto contenido de sacarosa.

El azúcar cristalizado después de la centrifugación pasa por un proceso de secado, en el que se elimina el agua y se extrae el azúcar con el tamaño ideal, separando el azúcar de tamaño muy grande. El proceso de secado no se efectúa para el azúcar crudo a granel.

La miel A se pasa al tacho B en el cual hay semilla B que es azúcar refinada triturada. Los cristales comienzan a absorber la sacarosa presente en la miel, hasta obtener un azúcar muy pequeño, que se utiliza como semilla en el tacho A. Del tacho B se obtiene miel B, que se lleva al tacho C, en donde se realiza el mismo proceso que en otros tachos.

Dado este proceso de fabricación, es lógico que la calidad de la meladura sea importante y determinante en la fabricación de azúcar, es por ello que se realizó esta caracterización de sedimentos húmedos en la meladura, tanto clarificada como concentrada, verificando que evaporador se encontraba en aseo en ese periodo de tiempo en el que se realizó el muestreo, ya que se quería verificar si el aseo realizado a ciertos evaporadores genera mayor arrastre de sedimentos, afectando así la calidad del material.

A continuación se manifestaran los resultados obtenidos en esta investigación:

Tabla 23. Datos correspondientes a la variación de sedimentos húmedos en la meladura concentrada.

Evaporador en aseo:	Sedimentos húmedos (%)Promedio	pH	Turbiedad (NTU)	°Brix
Evaporador de placas	1,45	6,85	39,25	64,18
Evaporador N°2	1,21	6,65	48,48	62,52
Evaporador N°3	0,44	6,47	47,25	54,67
Evaporador N°4	1,10	6,87	49,47	60,57
Evaporador N°5	0,44	6,62	53,36	62,91
Evaporador N°6	0,42	7,19	34,90	54,52
Evaporador 7-8	1,02	6,88	75,29	57,78

Grafico 24. Variación promedio de los sedimentos húmedos en la meladura concentrada.

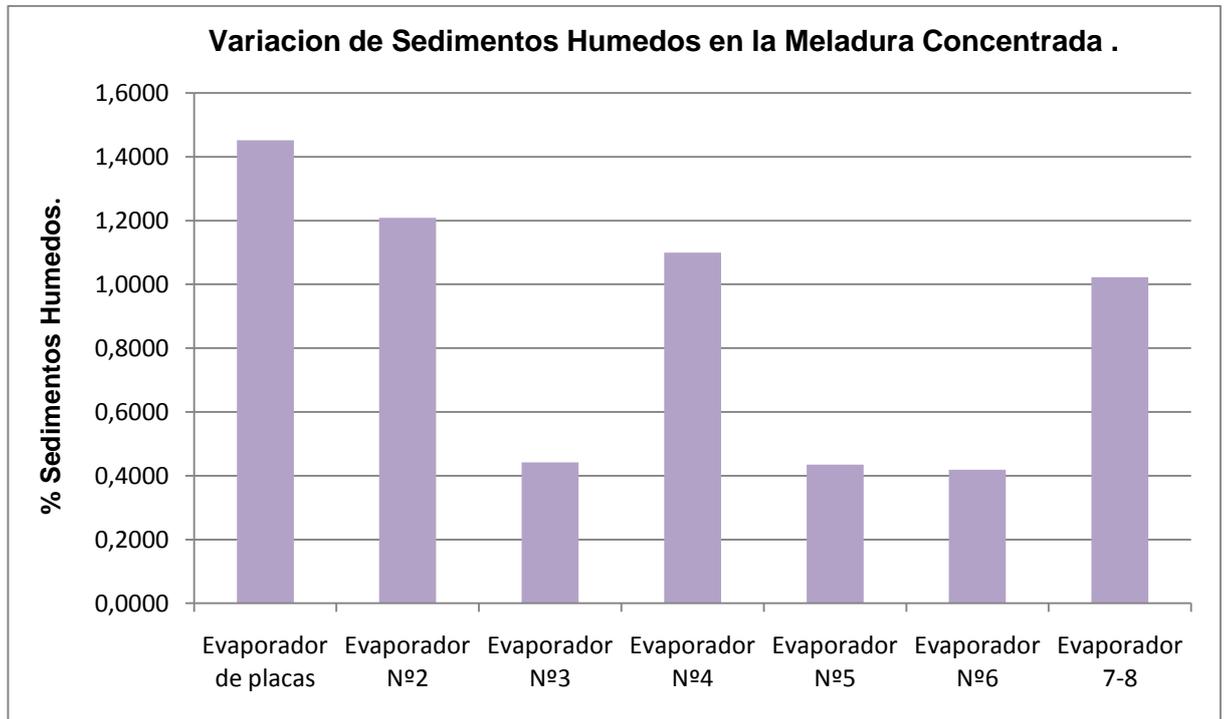
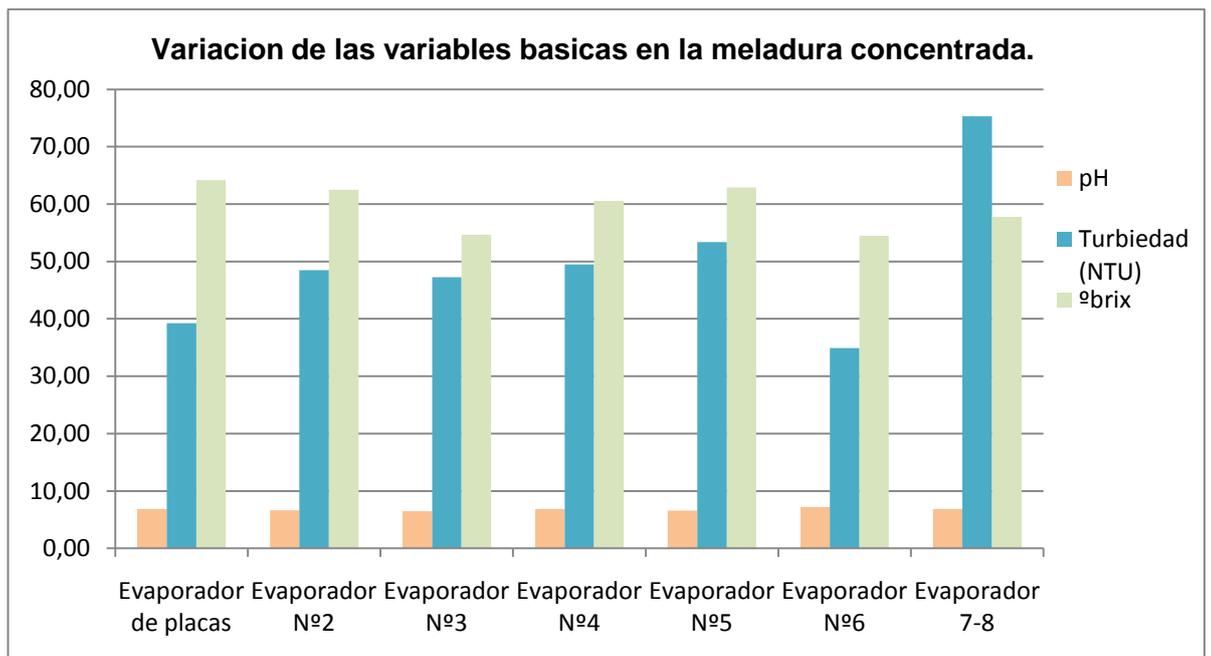


Grafico 25. Variación promedio de los parámetros básicos en la meladura concentrada.



El grafico 24 muestra la variación de la cantidad de sedimentos hallados en diversas muestras de meladura concentrada, en diferentes periodos de aseo de evaporadores, de esta manera se observa que cuando el evaporador de placas se encuentra en periodo de aseo, la meladura concentrada presenta el mayor porcentaje de sedimentos húmedos. De esta misma forma el grafico N° 25, enseña la variación de las variables básicas de control, como lo es el pH, la turbiedad y los grados brix, que son correspondientes a cada muestra de los evaporadores, allí se evidencia que la turbiedad se presenta en su mayor valor cuando los evaporadores 7-8 se encuentran de aseo, lo que quiere decir que el evaporador N° 6 en ese momento está siendo utilizado como concentrador de meladura, de esta manera vemos que para la meladura concentrada es independiente la cantidad de sedimentos hallados en las muestras, respecto a las variables básicas de control.

Ahora se da paso a los sedimentos húmedos encontrados en la meladura clarificada:

Tabla 24. Datos correspondientes a la variación de sedimentos húmedos en la meladura clarificada.

Evaporador en aseo:	Sedimentos húmedos (%) Promedio	pH	Turbiedad (NTU)	°Brix
Evaporador de placas	0,4589	7,08	53,19	49,69
Evaporador N°2	0,5075	6,76	39,41	44,53
Evaporador N°3	0,3750	13,18	53,58	38,15
Evaporador N°4	0,5309	21,08	40,73	47,42
Evaporador N°5	0,4878	6,83	35,51	48,73
Evaporador N°6	0,6538	7,40	30,40	54,04
Evaporador N° 7-8	1,2341	6,81	31,07	51,76

Grafico 26. Variación promedio de los sedimentos húmedos en la meladura clarificada.

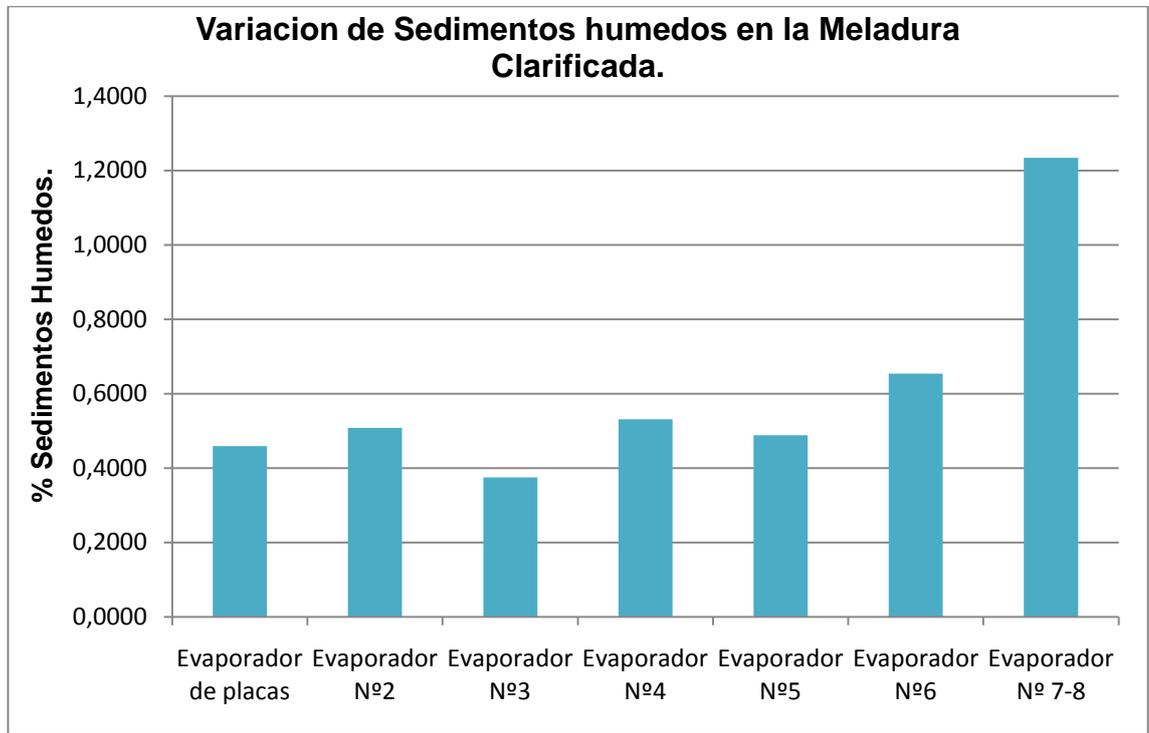
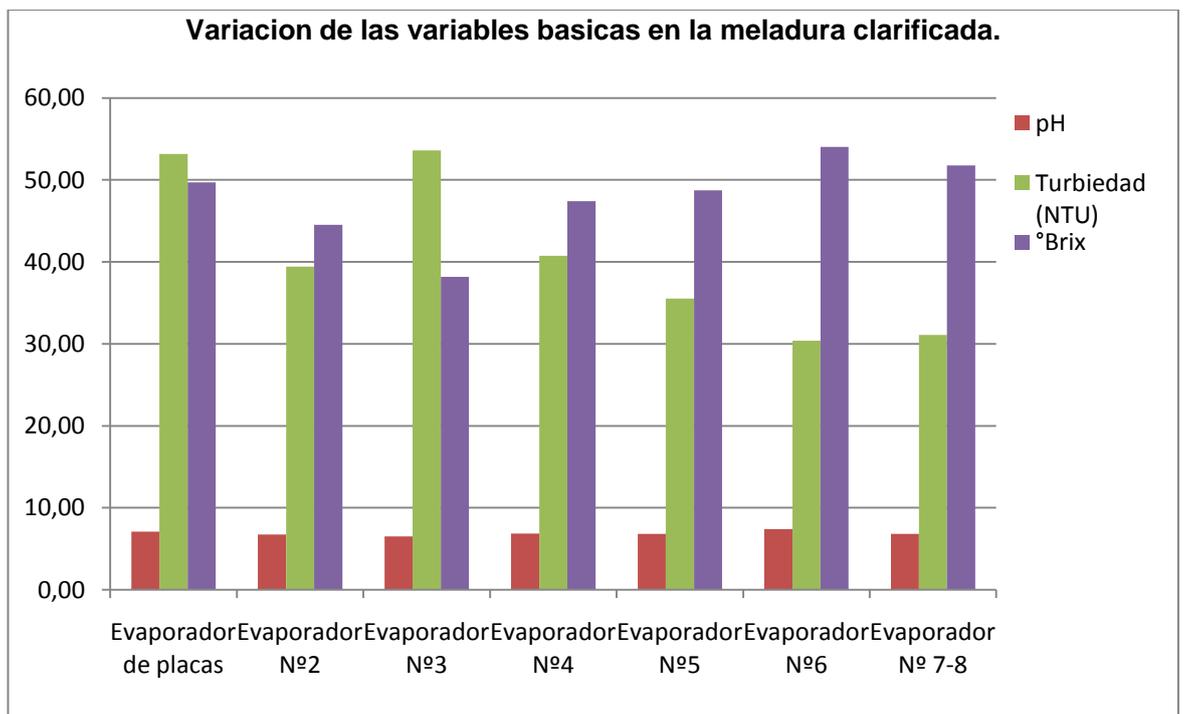


Grafico 27. Variación promedio de los parámetros básicos en la meladura clarificada.



El grafico 26 donde se muestra el comportamiento de los sedimentos húmedos en la meladura clarificada, es claro que en el periodo de tiempo de aseo de los evaporadores 7 y 8, la meladura clarificada presenta su mayor porcentaje de sedimentos, estos evaporadores son los usados como los concentradores de meladura, cuando los dos evaporadores se encuentran en aseo el evaporador numero 6 queda asignado como concentrador, mientras que el evaporador N°5 queda como único descargue de meladura al clarificador. El grafico 27 donde se muestran las variables básicas de la meladura clarificada, es claro que los mayores valores de turbiedad se dan cuando el evaporador de placas se encuentra en aseo, tanto el pH como los grados brix se pueden considerar constantes, ya que la variación que se muestra no es muy significativa

En el anexo M y N, se encuentran los gráficos de control para la meladura concentrada y la clarificada.

En el Anexo M correspondiente al grafico de control para sólidos sedimentables en fase húmeda realizado para meladura clarificada, muestra dos picos predominantes , estos se dieron durante el aseo a los evaporadores 5 - 6- 7- 8, en ese orden respectivamente, en los días 07-08 de Julio del 2009, el aseo se realizo de la siguiente manera:

El primer aseo programado para el evaporador N°5, seguido a este se realizo el aseo al evaporador N°6, para poder sacar de la línea los concentradores de meladura, evaporadores N°7 y N°8, donde por defecto quedaría como concentrador el evaporador N°6, este cambio de líneas de evaporación, ejercen sobre el fluido un tipo de fuerza, lo cual genera el arrastre de partículas extrañas y trazas de cal, es por esto que en el primer cambio del tándem de evaporación, se dan estos altos porcentajes de sólidos en la meladura clarificada y más adelante en la meladura concentrada, otro factor que afecta la cantidad de sedimentos presentes en la meladura, es el flujo que se maneja desde el pulmón de meladura hacia el clarificador, ya sea generado por la rata de molienda o por el nivel del pulmón de meladura (nivel lleno 102%), evitando una buena eficiencia del proceso, porque se disminuye el tiempo de residencia del material, la dosificación de insumos químicos que permiten la clarificación debe aumentar, y como el operador en cargado no está pendiente a este tipo de cambios, la turbiedad aumenta, ya que la floculación se ve afectada por el tiempo mínimo en que los reactivos se encuentran en contacto con la meladura.

Sin embargo, el grafico de control elaborado para la meladura clarificada y meladura concentrada muestra que el proceso tiene buenos resultados ya que la mayoría de los datos están dentro de los límites de control.

Correlaciones de Pearson para la meladura concentrada.

Tabla 25. Correlación de Pearson en la meladura clarificada.

		pH	°Brix	Turbiedad	Sedimentos húmedos
pH	Correlación de Pearson	1	-,021	-,138	,194
	Sig. (bilateral)	.	,883	,338	,177
	N	50	50	50	50
°Brix	Correlación de Pearson	-,021	1	-,137	-,135
	Sig. (bilateral)	,883	.	,341	,351
	N	50	50	50	50
Turbiedad	Correlación de Pearson	-,138	-,137	1	,009
	Sig. (bilateral)	,338	,341	.	,948
	N	50	50	50	50
Sedimentos húmedos	Correlación de Pearson	,194	-,135	,009	1
	Sig. (bilateral)	,177	,351	,948	.
	N	50	50	50	50

Grafico 28. Grafico de dispersión matricial para la meladura concentrada.



Como se puede observar en el gráfico 28 los datos no presentan ningún tipo de comportamiento como ya se discutió anteriormente en las figuras 25-26-27, donde se describían los tres tipos de comportamiento de un gráfico de dispersión para la correlación de Pearson, por esto podemos afirmar con seguridad que no existe relación entre las variables básicas a evaluar en el material y los sedimentos húmedos hallados en la meladura concentrada.

Estadísticos descriptivos Meladura Concentrada.

Tabla 26. Estadísticos descriptivos de las variables básicas y sedimentos húmedos en meladura concentrada.

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.	C.V (%)
Sedimentos húmedos en Meladura Concentrada	50	0,16	1,26	0,5323	0,22141	41,59
pH en la Meladura Concentrada	50	5,91	7,43	6,7568	0,37882	5,61
°Brix Meladura Concentrada	50	6,41	71,24	60,4846	9,40838	15,55
Turbiedad Meladura Concentrada	50	20,04	148,00	50,9668	26,01914	51,05
N válido (según lista)	50					

Estadísticos descriptivos Meladura Clarificada.

Tabla 27. Estadísticos descriptivos de las variables básicas y sedimentos húmedos en meladura clarificada.

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.	C.V (%)
Sedimentos húmedos Meladura Clarificada	50	0,28	3,18	0,6151	0,54817	89.12
pH Meladura Clarificada	50	5,78	7,63	6,8486	0,44842	6.54
° Brix Meladura clarificada	50	6,77	64,37	47,2068	7,92482	16.78
Turbiedad Meladura Clarificada	50	20,00	109,00	41,5320	16,35436	39.38
N válido (según lista)	50					

15. CONCLUSIONES

- A partir de la caracterización fisicoquímica realizada a la meladura, se pudo establecer las propiedades de cada variable que hace parte del proceso, realizando una evaluación respecto al flujo meladura entrante al clarificador, así como la dosificación de cada insumo respecto a este importante parámetro.
- Mediante la evaluación estadística de los datos analizados se halló que el proceso se encuentra dentro de los límites de control LSX+2s y LIX-2s, de manera que el proceso muestra un comportamiento satisfactorio con respecto al objetivo de la estación de clarificación de meladura.
- Mediante el seguimiento realizado a la cantidad de sedimentos húmedos presentes en la meladura clarificada, y la meladura concentrada, se puede concluir que mediante el aseo a los evaporadores N°7-8 se presenta la mayor cantidad de sedimentos en la meladura clarificada, es decir cuando el evaporador N°5 está siendo usado como descargue de meladura cruda al tanque pulmón de clarificador, donde se presentan valores de turbiedad final superiores a 40 NTU, de esta misma forma se pudo observar en los gráficos realizados para la variación de sedimentos húmedos en la meladura concentrada que este valor es máximo cuando el evaporador de placas está en periodo de aseo, también mediante la correlación de Pearson se pudo mostrar que la cantidad de sedimentos húmedos presentes en la meladura clarificada y concentrada, es independiente a las variables fisicoquímicas básicas del material, como lo son la turbiedad, el pH, y los grados brix.
- Se logró optimizar el sistema de dosificación de floculante teniendo en cuenta las variables que afectan la adición de este importante insumo para la clarificación, tal como el flujo de meladura cruda que ingresa al clarificador, y la concentración del floculante que se desee manejar. Además se construyó una tabla que facilita el manejo de la dosificación, donde se relacionan las variables implicadas.
- Para lograr una óptima dosificación de tensoactivo se implementó una nueva bomba de dosificación tipo peristáltica con puerto de entrada de 5/20 mA que permite el enlace para trabajo en remoto con la estación de control central (I/A), teniendo mayor control sobre el consumo de

tensoactivo, tanto al momento de su preparación como de su dosificación.

- Se afinaron los gráficos de control existentes en la planta, para las variables más importantes de este proceso, como lo es el pH, la turbiedad, el porcentaje de remoción, los grados brix, fosfatos y sedimentos húmedos, mejorando la interpretación de los mismos.
- Mediante el seguimiento a la clarificación de meladura, se logro caracterizar fisicoquímicamente nueve variables implicadas en el proceso, mostrando su impacto en el material estudiado y las consecuencias para el producto final.
- Teóricamente se requieren 300ppm PO_4^{-3} para lograr una buena remoción de turbiedad, sin embargo mediante el análisis realizado se encontró que con contenidos diferentes de fosfatos en la meladura, se consiguen remociones de turbiedad satisfactorias.
- Se implementó una línea de dosificación de floculante preparado al 0.5% desde la estación de clarificación de jugo (clarificador N°1), lo cual permite evitar errores en la preparación de este insumo vital para el correcto desempeño de la coagulación.
- Se logró la adición de dos pisteros adicionales al palto aireador, quedando este finalmente con ocho pisteros, lo cual mejora la aireación proporcionada a la meladura, generando así un sistema de flotación optimo para este tipo de clarificación.
- Para contar con una buena clarificación se deben considerar múltiples variables, flujos, temperaturas, adición de insumos químicos, tiempo de residencia, cantidad de fosfatos en el meladura cruda entre otras. El floculante utilizado es de gran importancia en esta parte del proceso, ya que como es una clarificación por flotación este debe ser dosificado de acuerdo a la carga y la densidad de la meladura entrante.
- Mediante el tratamiento estadístico de los datos evaluados se encontró que para la meladura concentrada no existe correlación entre las siguientes variables sedimentos, turbiedad, pH y grados brix, indicando que la cantidad de sedimentos húmedos hallados son independientes de las variables estudiadas, lo cual se determino usando la correlación de Pearson.

16. RECOMENDACIONES

- Debido a la naturaleza de suspensión del sacarato de calcio se presentan incrustaciones calcáreas en las tuberías de conducción, por tanto se requiere investigar soluciones a nivel de la industria azucarera mundial para evitar este tipo de inconvenientes.
- Es importante que adicional a las medidas instrumentales existentes de control de pH como el papel indicador y el muestreo del laboratorio, se proyecte a mediano o largo plazo la automatización de esta variable, lo que permitirá una operación sin necesidad de un operador titular en el lugar.
- Se recomienda un trabajo de investigación adicional con el fin de determinar con mayor precisión la influencia del contenido de fosfatos y las demás variables implicadas en el proceso, dadas las correlaciones estadísticas halladas.
- Debido a que la clarificación de meladura se realiza por flotación es importante que el plato micronizador, que es el que produce la flotación de las impurezas, se encuentre siempre libre de incrustaciones por lo cual se podría proyectar la implementación de un sistema alternativo de aireación que entraría a funcionamiento, sin tener que sacar el equipo de clarificación de línea y de esta manera no afecta la calidad del producto final.
- Una situación común en la fabrica es que se presenten paros de proceso, ya sea por falta de caña, o algún daño en los equipos de las subestaciones de la fábrica, por ello es recomendable suspender paulatinamente la dosificación de insumos (químicos) dado a que la meladura que se encuentra en el clarificador, o la que va a ingresar a este, se encuentra aún en proceso, para esto se sugiere que los primeros 15 min solo se debe reducir el 25% de la dosificación, a la media hora el 50%, a la hora u hora y cuarto del paro se debe quitar en su totalidad la dosificación de insumos, claro está que esto también depende del descargue continuo de flujo de meladura que proviene de los evaporadores hacia el pulmón de meladura, por consiguiente al tanque de reacción.

- Al momento de analizar un resultado de los parámetros estudiados, se debe conocer desde el origen de la caña, y sus propiedades, hasta el producto final de fabricación que se desea obtener, para así evaluar correctamente.
- El proceso debe ser manejado dentro de parámetros técnicos y económicos los cuales determinan la calidad de la meladura clarificada obtenida y los valores de operación de las principales variables de control del proceso: la razón aire/sólidos y la viscosidad. Por esto se debe enfatizar la importancia de la interpretación de los gráficos de control de la estación a los operadores.
- La coordinación entre estaciones aguas arriba y aguas abajo del proceso, es fundamental para el correcto desempeño de la estación, por tanto es importante recordar que cuando se presentan dificultades en la clarificación, como en los casos de clarificadores revueltos, se debe tomar en cuenta el conjunto de factores que intervienen en el tratamiento previo de la meladura y además, la operación del clarificador.
- Una de las variables de mayor interés dentro de la elaboración de azúcar, es el porcentaje de azúcares reductores presentes, como se menciona en el análisis, este es directamente relacionado con el pH del material, una manera de controlar la aparición de esta variable, es con la determinación de sacarosa, ya que las disminuciones en los niveles de sacarosa están acompañadas por el incremento en los azúcares reductores y descensos en el pH.
- Las variables básicas como lo son el pH, la turbiedad y los grados brix, son las que determinan la calidad del material, es por esto que se sugiere realizar el muestreo por parte del laboratorio con una frecuencia mínima de dos horas entre cada toma de muestra, que permita observar el comportamiento del proceso con el uso de la carta de control.
- Es vital la composición y concentración de los insumos (sacarato, floculante y tensoactivo), por ello es aconsejable estandarizar la preparación, generando de esta manera control de las variables implicadas.

17. BIBLIOGRAFIA.

CIAMSA. Sociedad de comercialización internacional de azúcares y mieles S. A. Página 11.

Clarificación de meladura por flotación. Claudio M. Vaz, Sergio M. Stamile Soares Y José Oswaldo Da Silva. Centro rio de janeiro. Brasil. 2008. Artículo de internet tomado de la pagina web www.engenovo.com.br Página 13.

Proceso de elaboración de azúcar. Ingenio Risaralda S.A. tomado de la pagina web www.ingeniorisaralda.com Pagina 17; 35.

Universidad Nacional de Colombia. Sede Manizales. Acueductos y alcantarillados. Artículo de internet, tomado de la página web: [http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080004/contenido/Capitulo_8/Pages/Proceso_tratamiento_aguas\(b\)_continuacion1.htm](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/manizales/4080004/contenido/Capitulo_8/Pages/Proceso_tratamiento_aguas(b)_continuacion1.htm).
Página 23

Tensoactivo. Definición tomada de la pagina web www.quiminet.com.
Página 25

Turbiedad. Definición extraída de las páginas web:
<http://www.aguamarket.com/diccionario/terminos.asp?Id=2103&termino=>
<http://www.triwan.com/news/turbi.htm>. Página 26.

Grados brix. Definición extraída de la página web:
<http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/agronomia/2006228/teoria/obpulpfru/p7.htm>. página 27.

Problemas de la purificación del jugo en una fábrica de azúcar de caña de una norma de molienda de mediana capacidad. José M. Domínguez Estupiñán, Minervino Vinent Reve. 2002 .Pagina 31

Seguimiento de las variables fisicoquímicas del clarificador SRI y verificación de la eficiencia del tacho continuo Fletcher Smith para la optimización de la elaboración de azúcar en el ingenio Risaralda. Cardona Montoya, Mónica Liliana. 2009. Páginas 32-43-48

Evaluación comparativa del método de sulfitación frente al empleo de peróxido de hidrogeno en el proceso de decoloración de meladura. Diana María Flórez Gálvez. 2007. *Página 37*.

Global leader in water. Soluble polymers for water and wastewater treatment. SNF, Inc. FLOPAM AN 934 VHM. Página 42.

Revista universidad de caldas, enero - diciembre 2006 estudio de la distribución de tiempos de Residencia para un reactor electroquímico De compartimentos separados. Henry Reyes Pineda. Enero- diciembre del 2006. Artículo tomado de la pagina web [http://200.21.104.25/udecaldas/downloads/RevistaUC26\(1_2\)_2.pdf](http://200.21.104.25/udecaldas/downloads/RevistaUC26(1_2)_2.pdf).
Página 53.

Capacidad de proceso. Ingeniero Julio Carreño. 2006. Página 67.

Documentación del laboratorio de calidad y conformidad el Ingenio Risaralda S.A.

Beet Sugar Handbook. Mosen Asadi. Copyright © 2007 John Wiley & Sons, Inc. ISBN 9780471763475. Publicado el 7 octubre 2005.

LA GLUCOSILACION NO ENZIMATICA DE LAS PROTEINAS. Mecanismo y papel de la reacción en la diabetes y el envejecimiento. Luis González Flecha, Pablo R. Castello, Juan J. Gagliardino y Juan Pablo F.C. Rossi 2000. Artículo de internet: <http://www.ciencia.cl/CienciaAIDia/volumen3/numero2/articulos/articulo2.html>

La calidad de la caña de azúcar. Jesús Larrahondo. Cenicaña. 2000. Página 134.

18. ANEXOS

ANEXO A.



**GUIA PARA LA DOSIFICACION DE MAXIPHOS Y FLOCULANTE
SEGÚN EL CAUDAL DE MELADURA CRUDA.**

Flujo de meladura (m ³ /h)	Flujo de Floculante (L/min)	Flujo de Maxiphos (mL/min)	Ajuste bomba Maxiphos. (%)
40	5.47	21	25
45	6.15	24	30
50	6.83	27	35
55	7.52	29	40
60	8.23	32	45
65	8.88	35	50
70	9.56	37	55
75	10.25	40	60

ANEXO B.

TABLA DE DOSIFICACION DE MAXIPHOS A LA MELADURA CRUDA.

 DOSIFICACION DE MAXIPHOS A LA MELADURA.			
Flujo de Meladura cruda (m ³ /h)	DOSIS DE MAXIPHOS 5259 (ppm)		
	13 ppm	14 ppm	15 ppm
40	21 MI/min	23 MI/min	25 MI/min
45	24 MI/min	26 MI/min	28 MI/min
50	27 MI/min	29 MI/min	31 MI/min
55	29 MI/min	32 MI/min	34 MI/min
60	32 MI/min	35 MI/min	37 MI/min
65	35 MI/min	38 MI/min	40 MI/min
70	37 MI/min	40 MI/min	43 MI/min
75	40 MI/min	43 MI/min	46 MI/min

ANEXO B.1

AFORO A LA BOMBA DOSIFICADORA DE MAXIPHOS

AFORO BOMBA MILTON ROY.	
Ajuste (%)	Flujo (mL/min)
10	6,3
15	9,5
20	13
25	16
30	19
35	23
40	27
45	31
50	35
55	37
60	40
65	43
70	46
75	50
80	53
85	55
90	57
95	60
100	63

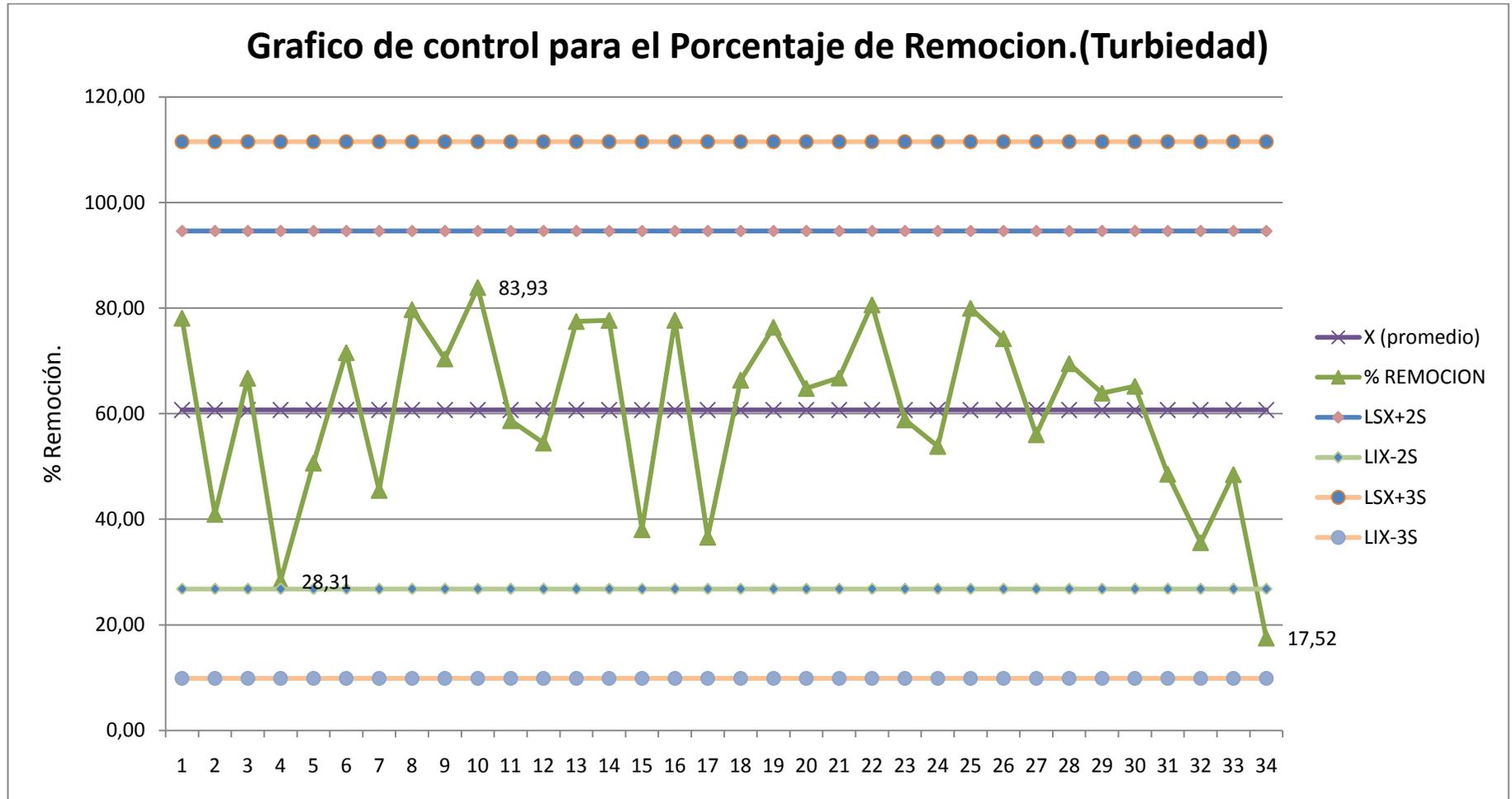
BOMBA ELECTROMAGNETICA DE DIAFRAGMA, DOSIFICADORA DE MAXIPHOS.

CAPACIDAD MAXIMA DE FLUJO: 1.00 GPH

MAXIMA PRESION DE DESCARGA: 110psi

Regulación de flujo manual por medio de perilla micrométrica ajustable de 0 – 100% de su rango de flujo.

ANEXO C.



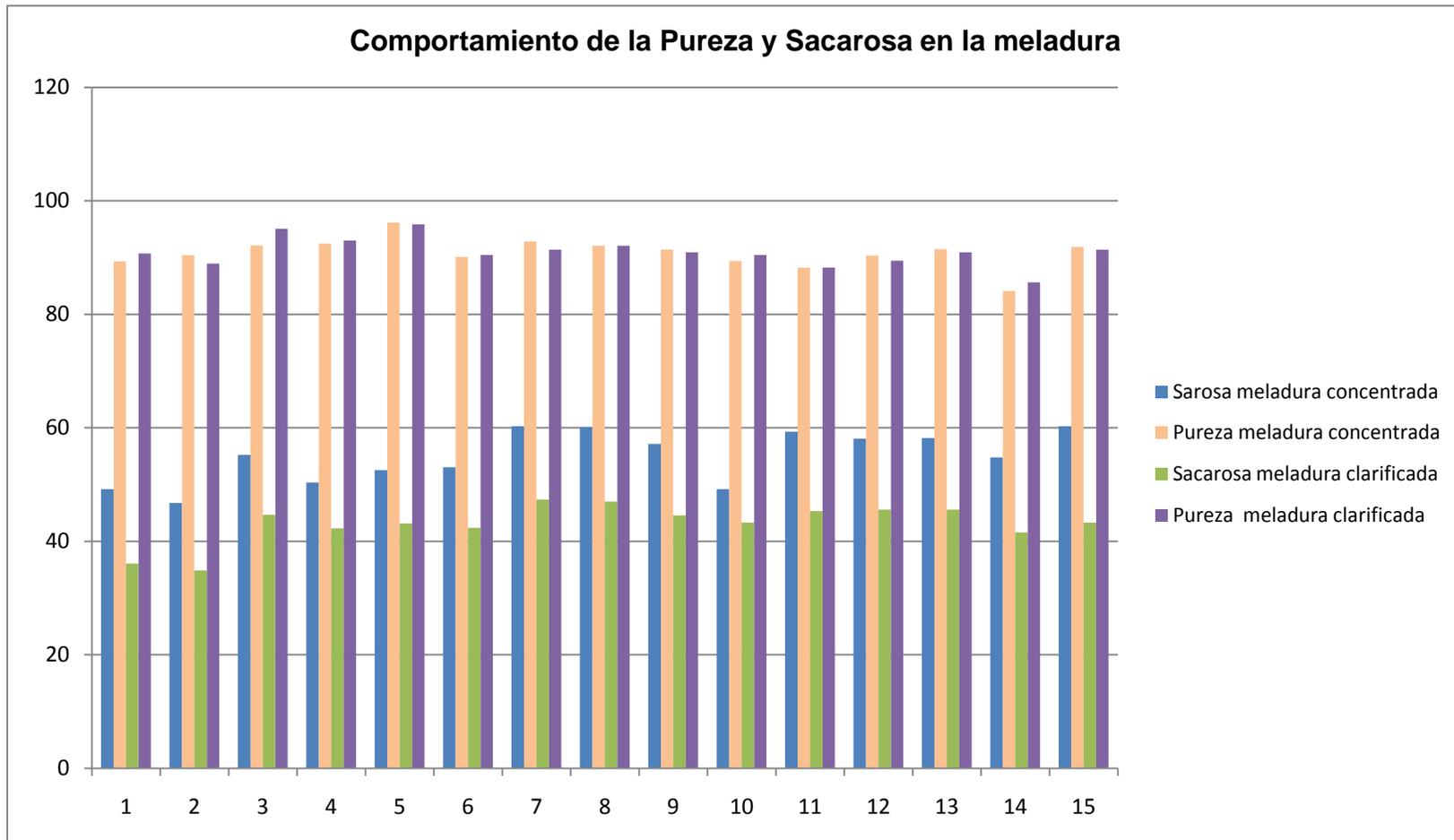
ANEXO D.

TRATAMIENTO ESTADISTICO DEL PORCENTAJE DE REMOCION.

Fecha	Turbiedad inicial (NTU)	Turbiedad final (NTU)	% Remoción	\bar{X}	S (Desv. Est.)	LSX+3S	LIX-3S	LSX+2S	LIX-2S
05/05/2009	318	69,6	78,11	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
	85,7	50,6	40,96	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
	230	76,5	66,74	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
	166	119	28,31	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
08/05/2009	60,4	29,8	50,66	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
	85,2	24,2	71,60	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
	96,5	52,6	45,49	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
	294	59,6	79,73	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
09/05/2009	149	44,1	70,40	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
	333	53,5	83,93	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
	116	47,9	58,71	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
	123	56	54,47	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
12/05/2009	136	30,6	77,50	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
	134	29,9	77,69	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
	41,8	25,9	38,04	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
	110	24,5	77,73	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
16/05/2009	68	43,1	36,62	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
22/05/2009	89,5	30,1	66,37	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
	147	34,7	76,39	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79

23/05/2009	154	54,2	64,81	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
05/06/2009	140	46,5	66,79	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
	330	63,9	80,64	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
	140	57,6	58,86	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
06/06/2009	133	61,4	53,83	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
	580	116	80,00	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
11/06/2009	182	46,9	74,23	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
	129	56,7	56,05	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
	198	60,4	69,49	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
	225	81,2	63,91	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
	140	48,7	65,21	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
12/06/2009	152	78,2	48,55	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
	145	93,4	35,59	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
	198	102	48,48	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79
	121	99,8	17,52	60,69	16,95	111,54	9,84	94,59	26,79

ANEXO E.



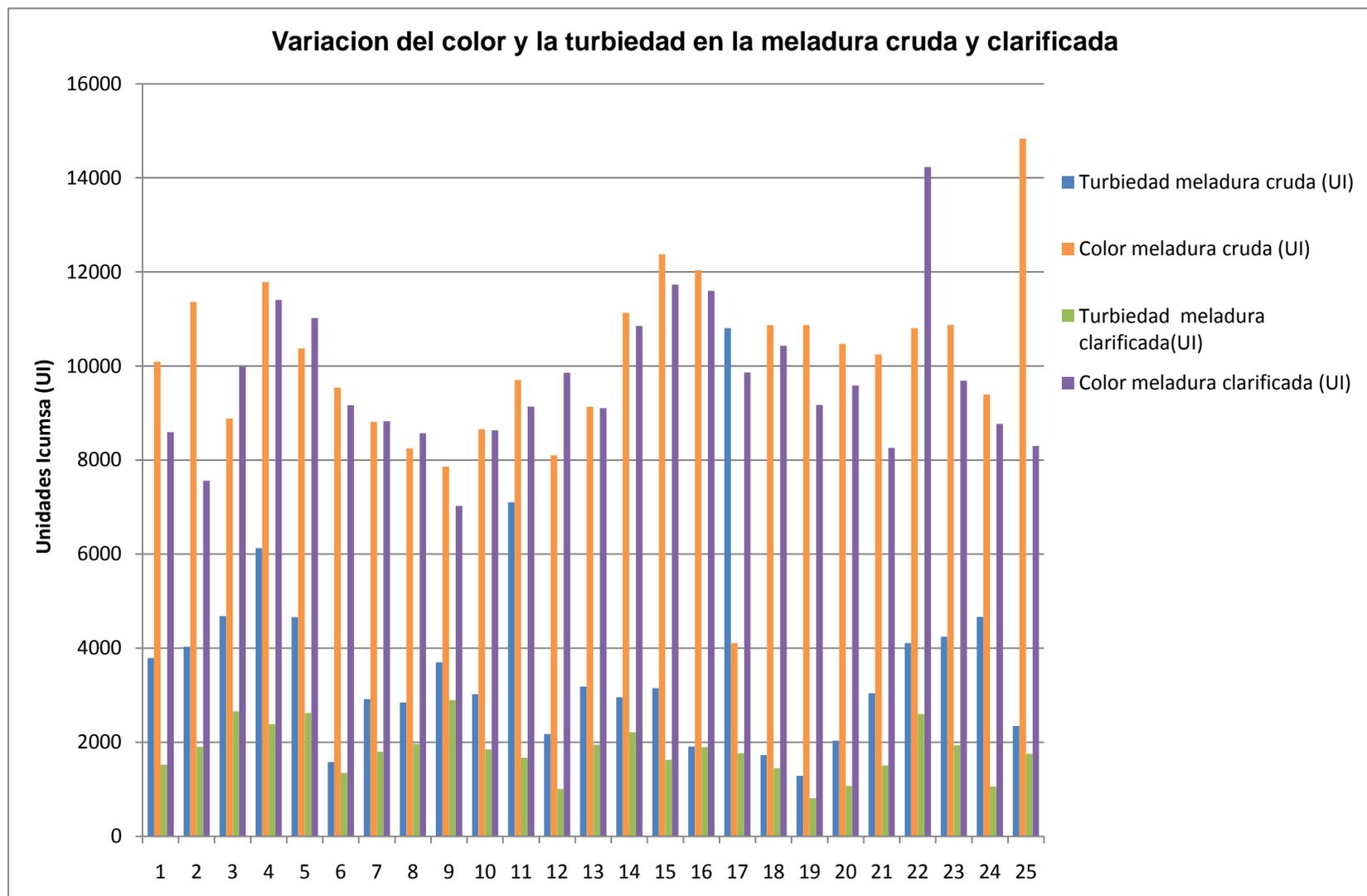
ANEXO F.

DATOS CORRESPONDIENTES A LA DETERMINACION DE COLOR Y TURBIEDAD (UI)

MELADURA CRUDA					MELADURA CLARIFICADA				
pH	°Brix	Turbiedad (NTU)	Turbiedad meladura cruda (UI)	Color meladura cruda (UI)	pH	°Brix	Turbiedad (NTU)	Turbiedad meladura clarificada(UI)	Color meladura clarificada (UI)
7,5	43,68	259	3791,21	10092	7,04	45,53	35,4	1526	8590,99
6,9	58,74	318	4031,31	11360	7,66	46,65	69,6	1905	7563,13
5,91	52,56	85,7	4679,09	8882	6,26	53,59	50,6	2656	9979,87
7,93	30,91	230	6127,82	11786	7,83	26,57	76,5	2388	11408,2
5,52	40,65	166	4658,38	10373	5,7	39,32	119	2622	11017,6
7,27	50,92	60,4	1580,94	9542,9	7,04	50,19	29,8	1349	9166,66
6,87	50,07	85,2	2918,36	8816,3	6,82	55,04	24,2	1801	8825,83
7,65	49,07	96,5	2845,69	8246,2	6,63	48,13	52,6	1969	8569,96
7,24	50,97	294	3698,63	7863,3	7,35	48,36	59,6	2896	7024,52
5,47	51,09	149	3022,78	8654,2	5,83	49,81	44,1	1845	8630,95
6,57	43,39	333	7103,17	9702,4	6,87	42,29	53,5	1670	9134,8
7,49	48,28	116	2177,69	8101,1	7,12	47,45	47,9	1006	9859,15
6,81	46,24	123	3185,33	9131,3	7,46	48,33	56	1946	9101,73
6,88	48,77	136	2957,75	11127	6,66	47,78	30,6	2215	10848,9

7,08	48,28	134	3151,26	12374	6,84	48,02	29,9	1627	11726,2
6,58	48,28	41,8	1911,47	12032	6,56	48,19	25,9	1898	11599,2
6,79	42,19	65,8	10802,35	4109,6	7,32	49,87	56	1766	9861,11
6,2	41,14	40,63	1730,38	10865	6,91	42,14	43,65	1448	10430,5
6,12	46,78	56,23	1287,73	10865	6,69	42,14	48,7	810,8	9169,88
6,35	51,79	49,32	2035,73	10470	5,94	52,58	59,65	1071	9583,33
6,44	50,52	65,89	3040,82	10245	6,11	46,11	52,98	1507	8258,32
6,29	49,68	45,89	4109,59	10802	6,23	44,81	29,36	2603	14227
6,37	56,73	89,47	4243,07	10874	7,02	51,03	30,69	1937	9686,89
6,21	56,45	87,69	4663,41	9393,4	7,44	51,2	38,79	1057	8767,12
6,06	46,59	76,23	2348,34	14834	6,66	49,7	32,69	1757	8301,16

ANEXO G

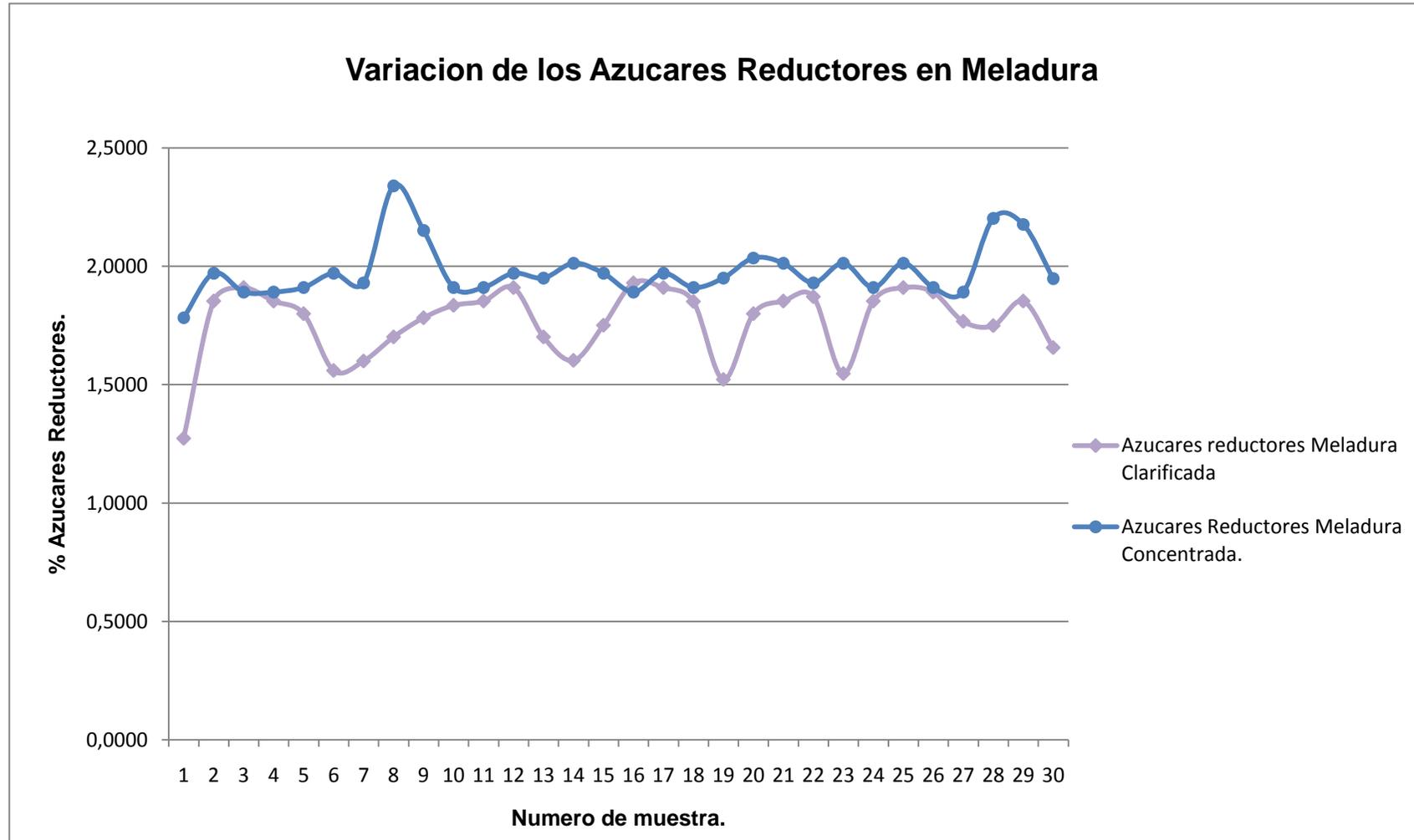


ANEXO H.

ANÁLISIS DE AZUCARES REDUCTORES, RESULTADOS.

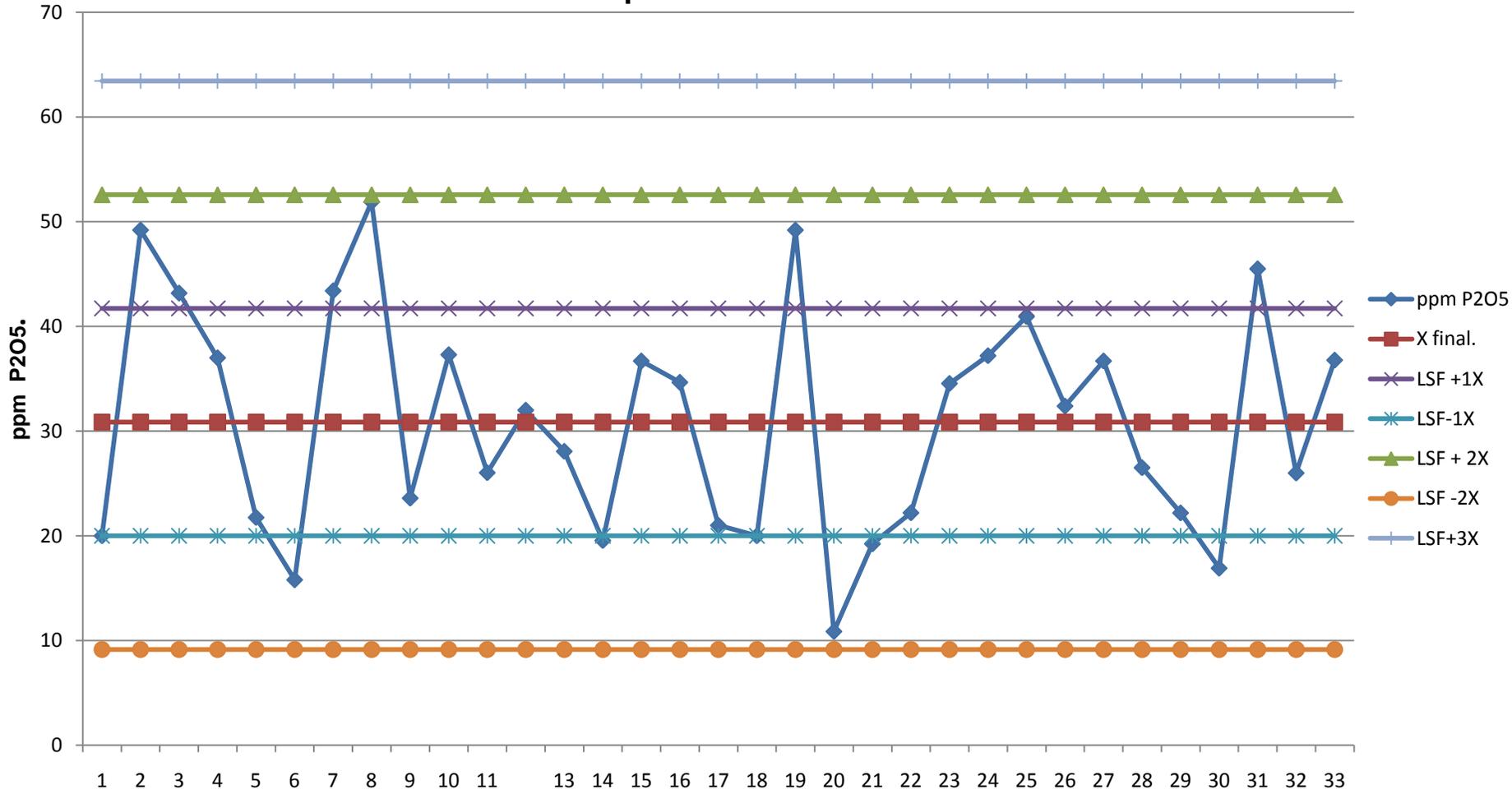
Azucares reductores (%) Meladura Clarificada	Azucares Reductores (%) Meladura Concentrada.
1,2735	1,7829
1,8535	1,9705
1,9102	1,8909
1,8535	1,8909
1,8000	1,9102
1,5600	1,9705
1,6000	1,9299
1,7018	2,3400
1,7829	2,1517
1,8353	1,9102
1,8535	1,9102
1,9102	1,9705
1,7018	1,9500
1,6027	2,0129
1,7512	1,9705
1,9299	1,8909
1,9102	1,9705
1,8516	1,9102
1,5220	1,9500
1,8000	2,0348
1,8535	2,0129
1,8720	1,9299
1,5471	2,0129
1,8535	1,9102
1,9102	2,0129
1,8909	1,9102
1,7677	1,8909
1,7495	2,2024
1,8535	2,1767
1,6566	1,9480

ANEXO I



ANEXO J.

Grafico de Control para Fosfatos en Meladura Clarificada

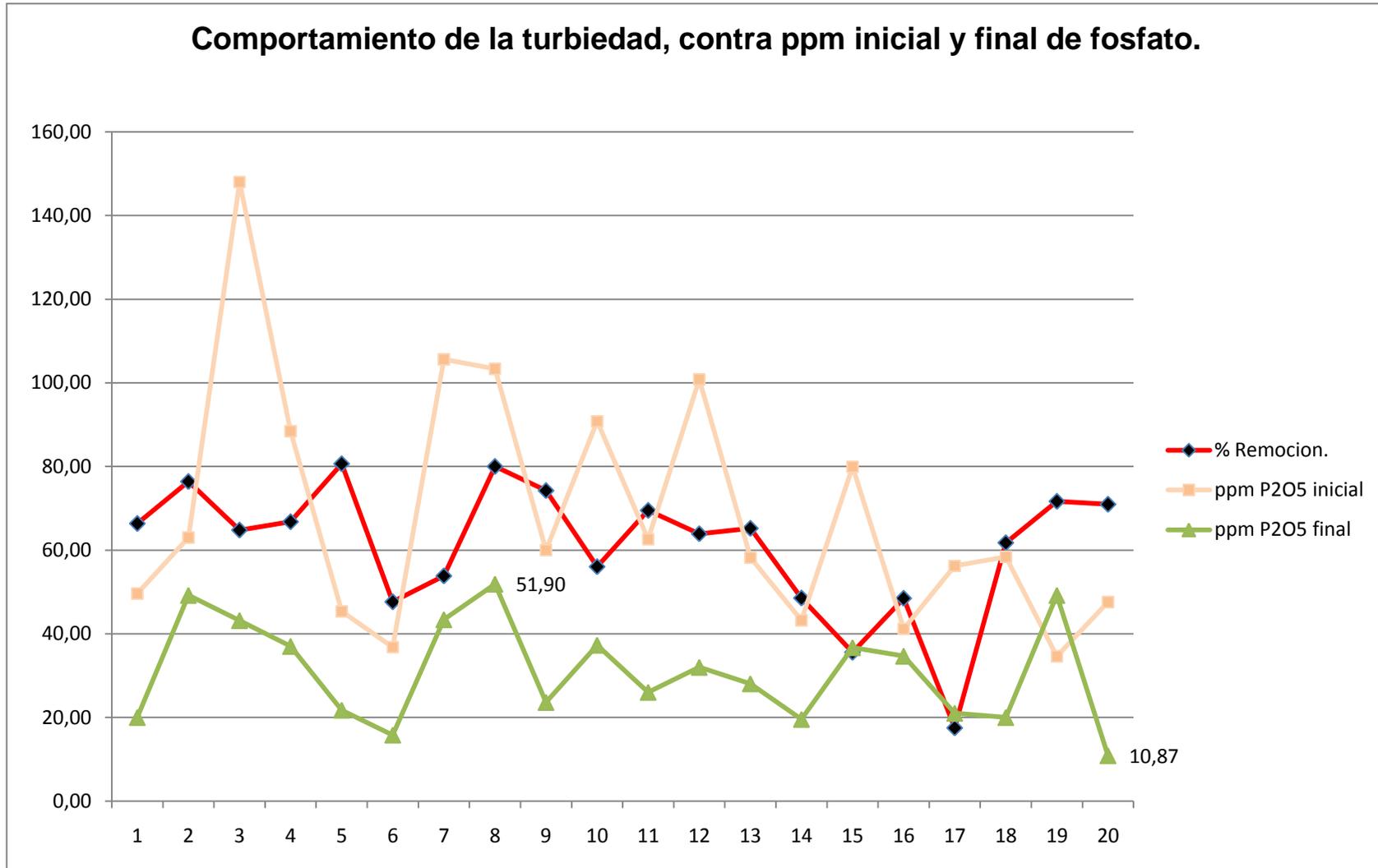


ANEXO K.

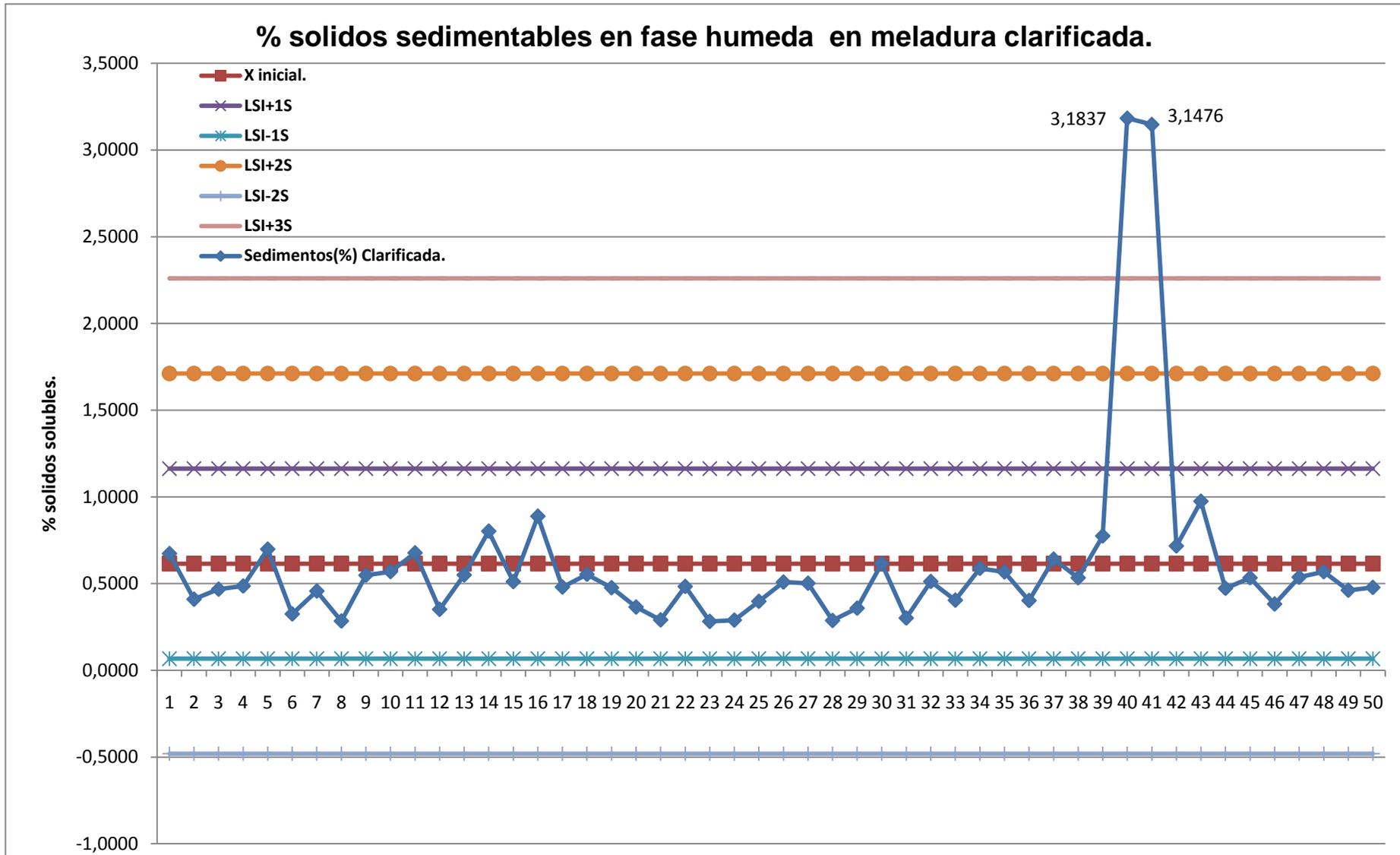
TRATAMIENTO ESTADISTICO PARA EL GRAFICO DE CONTROL DE LOS FOSFATOS EN LA MELADURA CLARIFICADA.

Meladura Clarificada.								
ppm P2O5	\bar{X}	S	LSF +1X	LSF-1X	LSF + 2X	LSF -2X	LSF+3X	LSF-3X
20,00	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
49,20	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
43,18	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
37,00	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
21,75	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
15,80	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
43,40	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
51,90	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
23,60	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
37,30	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
26,03	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
32,00	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
28,07	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
19,55	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
36,70	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
34,66	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
21,00	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
20,00	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
49,20	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
10,87	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
19,23	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
22,20	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
34,55	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
37,20	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
40,94	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
32,39	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
36,70	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
26,51	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
22,19	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
16,91	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
45,50	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
26,00	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710
36,78	30,86	10,86	41,71	20,00	52,57	9,15	63,425	-1,710

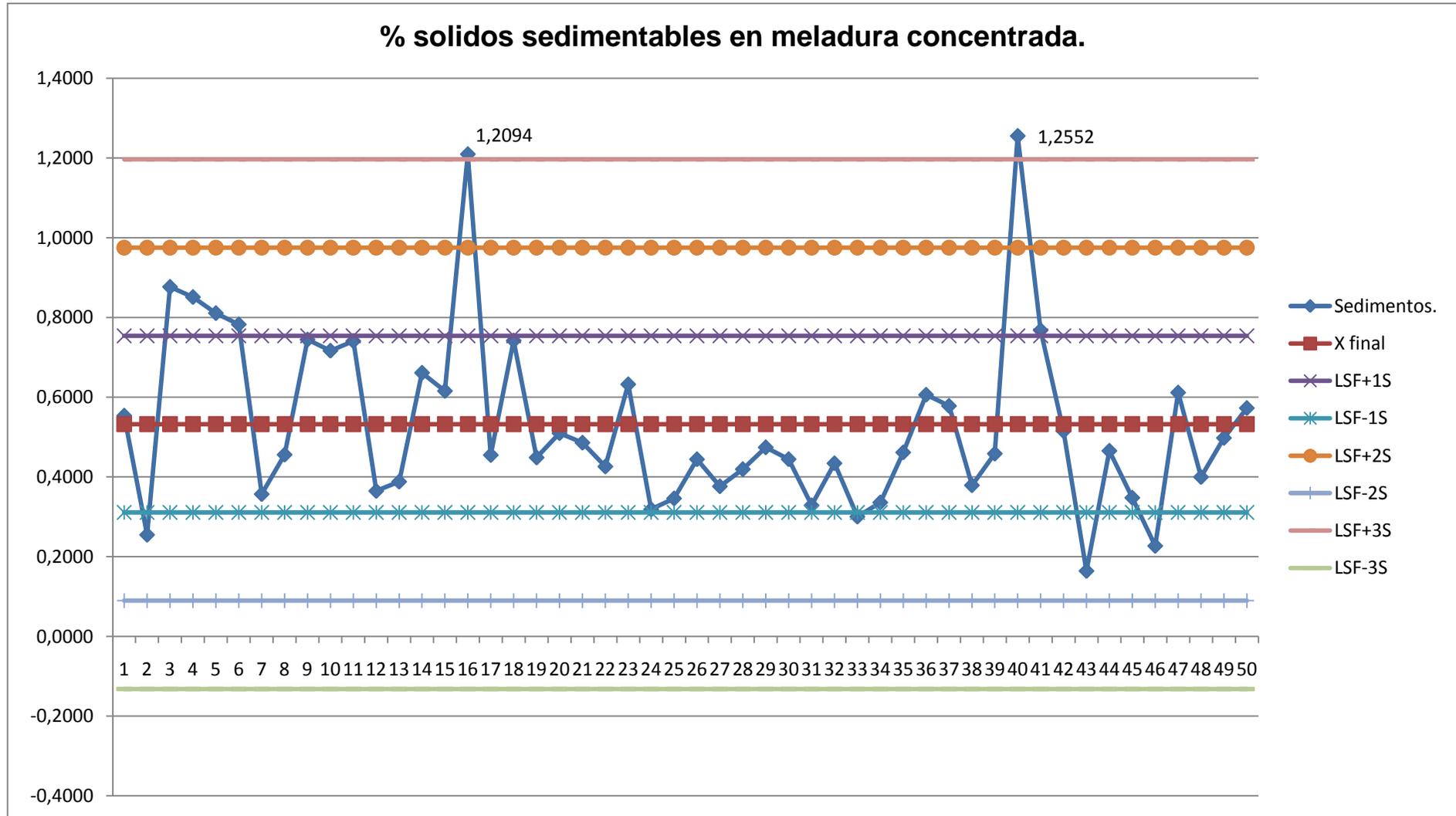
ANEXO L.



ANEXO M.

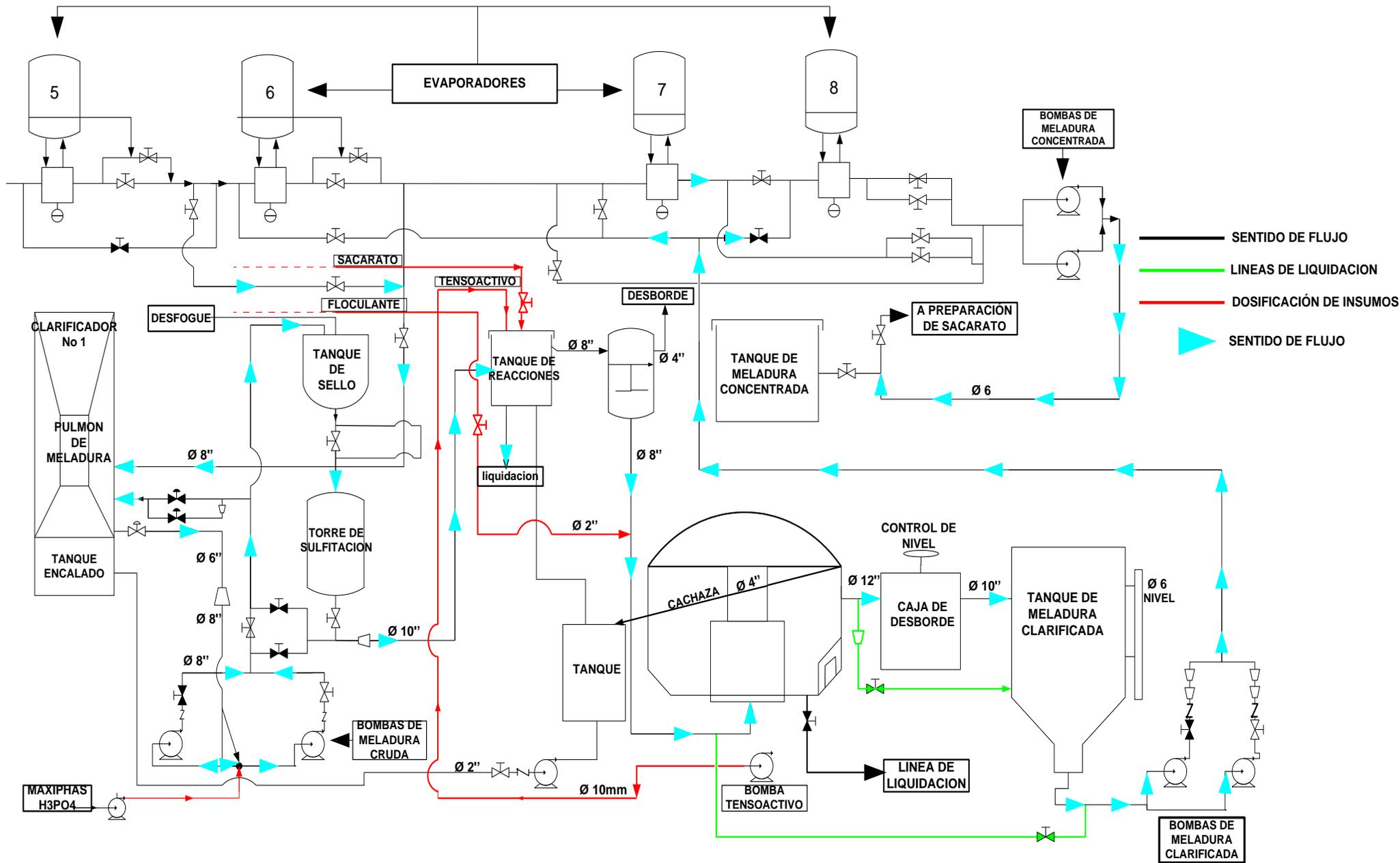


ANEXO N



ANEXO O
FLUJO GRAMA DE CLARIFICACIÓN DE MELADURA.

PROCESO DE CLARIFICACION DE LA MELADURA



EQUIPOS DEL PROCESO DE CLARIFICACION DE MELADURA.

EQUIPO	CAPACIDAD	DIAMETRO	ALTURA
Tanque pulmón de meladura sin clarificar.	58,5 m ³	6.50 x 2.99	-
Tanque de meladura.	76,50 m ³	14' 10-9/16"	17'9-15/16"
Tanque espuma	1,06 m ³	3'-0"	5'-4"
Tanque de reacción de meladura.	0.35 m ³	1'-8"	6'-7"
Tanque de cachaza	9 m ³	-	-
Tanque pulmón meladura concentrada	100 m ³		
Tanque alimentador de bombas de meladura clarificada.	1.79 m ³	3'-10"	5'-6"
Tanque de jugo encalado	113.14 m ³	6,50	-

ANEXO P.

**ACTIVIDAD COMPLEMENTARIA.
CLARIFICACION DE JUGO FILTRADO.**

CLARIFICACION DE JUGO FILTRADO.

El objetivo de este proceso es suministrar un material en mejores condiciones, proveniente de los filtros de cachaza, para las siguientes etapas de elaboración, disminuyendo el consumo de insumos en las demás estaciones.

Descripción Breve del proceso e identificación del problema:

En esta estación de clarificación de jugo filtrado se trata con jugo turbio que proviene de los filtros rotatorios de cachaza, que es donde se recupera la máxima cantidad posible de sacarosa que acompaña a los lodos generados en los clarificadores de jugo para minimizar las pérdidas del proceso.

Jugo extraído de la cachaza por el proceso de filtración, contiene entre 8 - 14% de sacarosa. Este jugo se debe someter a un proceso de clarificación antes de unirlo con el jugo de los clarificadores para enviarlo a evaporadores, pero si la calidad del jugo no es buena se retorna al tanque de encalado.

La temperatura del jugo filtrado se encuentra alrededor de los 55°C por lo que se posee un intercambiador de placas antes de ingresar al tanque de reacción, con el cual se pretende elevar la temperatura hasta el punto óptimo (85°C), el intercambiador del cual se dispone en planta es muy pequeño y dadas las características del jugo filtrado (Bagacillo e impurezas) este se incrusta fácilmente y disminuye su área de transferencia de calor, por lo que hay que sacarlo de servicio dado a que queda inservible, por lo tanto en algunas ocasiones se prefirió by-passear el jugo directamente al tanque de reacción, presentándose un deficiente desarrollo en el proceso, ya que se debe incorporar este calentamiento al sistema debido a las ventajas que ofrece en cuanto a la floculación.

A la salida del tanque de reacción se une una línea que trae jugo filtrado clarificado desde la bomba aireadora en donde se le adiciona aire a presión al proceso, para que se pueda llevar a cabo la flotación. Después se agrega floculante para aglomerar los flóculos primarios y el aire. Este jugo aireado y en proceso de floculación secundaria entra por la parte inferior del clarificador donde los sólidos flotan, formando una capa de pompas que sobrenada sobre el jugo claro. La espuma se remueve con un raspador giratorio, de velocidad variable, hacia una canal en la periferia del clarificador y se envía por gravedad al tanque mezclador de cachaza.

El jugo filtrado ya clarificado sale desde el fondo del clarificador hacia una caja de desborde. Este flujo se envía por gravedad hacia el tanque de encalado ya que la clarificación no es la adecuada para unirlo con el jugo de los clarificadores por sedimentación, lo cual no es el propósito de este proceso, de esta manera solo se genera otra estación de operación con consumo innecesario y gasto de energía, lo cual no es conveniente para el proceso y la empresa.

Para conocer si es posible que se lleve a cabo este proceso se realizó una pequeña caracterización del material a clarificar (Jugo filtrado), realizando una breve comparación con el objetivo final que será el jugo clarificado, los resultados se muestran en la siguiente tabulación:

Tabla 1. Caracterización de jugo filtrado.

Jugo Filtrado.						
pH	Turbiedad (NTU)	° Brix	Sólidos en fase húmeda. (%)	Azúcares reductores. (%)	Sacarosa (%)	Pureza. (%)
11,69	1968	8,01	13,32		6,1078	77,1188
6,48	1893	13,26	10,19	0,4952	11,2334	84,3348
7,31	1692	14,15	10,85	0,6039	12,1139	84,9500
7,11	1896	13,97	10,96	0,4566	11,9034	87,4603
6,93	1598	13,91	9,52	0,4926	11,9528	87,1195
6,9	1796	12,62	9,63	0,4875	10,8915	88,4764
7,11	1696	13,08	11,74	0,5474	11,0677	85,3992
6,64	1456	11,85	10,69	0,4611	10,1323	85,5046
6,78	1823	11,89	10,69	0,4869	11,0036	86,3696
7,13	1578	12,63	10,56	0,4759	11,9465	86,4523
7,35	1426	14,23	10,45	0,5998	11,3625	57,3236

Tabla 2. Caracterización de Jugo Clarificado.

Jugo Clarificado.						
pH	Turbiedad (NTU)	° Brix	Sólidos en fase húmeda. (%)	Azúcares reductores. (%)	Sacarosa (%)	Pureza. (%)
7,61	109	15,92	9,55	0,527	13,9666	86,6412
7,25	97,4	12,53	9,42	0,5506	11,0007	87,0995
7,18	78,5	14,58	9,4	0,6324	12,9732	88,4937
6,91	108	15,6	9,42	0,4776	14,2774	89,3452
6,73	99,6	14,72	12,09	0,6411	12,8045	85,9942
6,8	94,3	14,38	11,91	0,6	12,5768	86,9161
7,16	86,2	14,86	9,51	0,6078	13,0101	88,3838
7,3	81,4	14,74	9,5	0,5379	12,9624	87,6960
7,2	85,6	13,26	9,89	0,5568	12,8695	85,6496
6,86	85,63	13,69	9,96	0,6691	13,0169	88,3836
7,14	96,32	12,68	9,95	0,4869	14,3698	89,3259

A continuación se comprara gráficamente las variables principales del proceso:

Grafico 1. Comparación del pH entre el jugo filtrado y jugo clarificado.

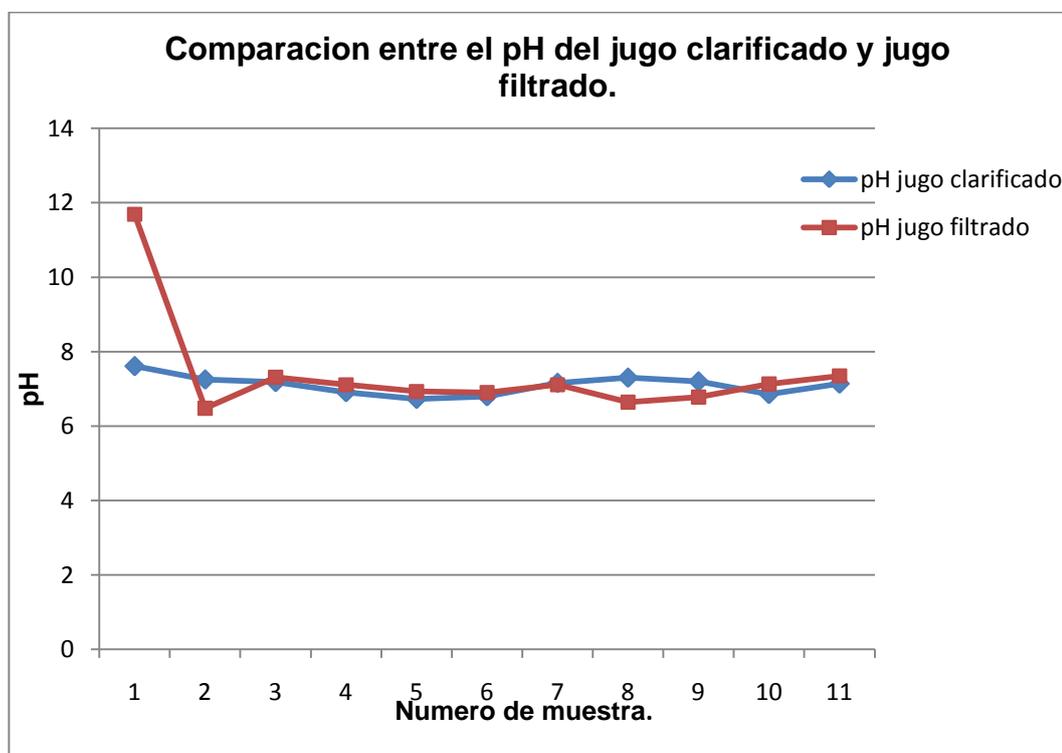


Grafico 2. Comparación entre el contenido de sacarosa en el jugo filtrado y en el jugo clarificado.

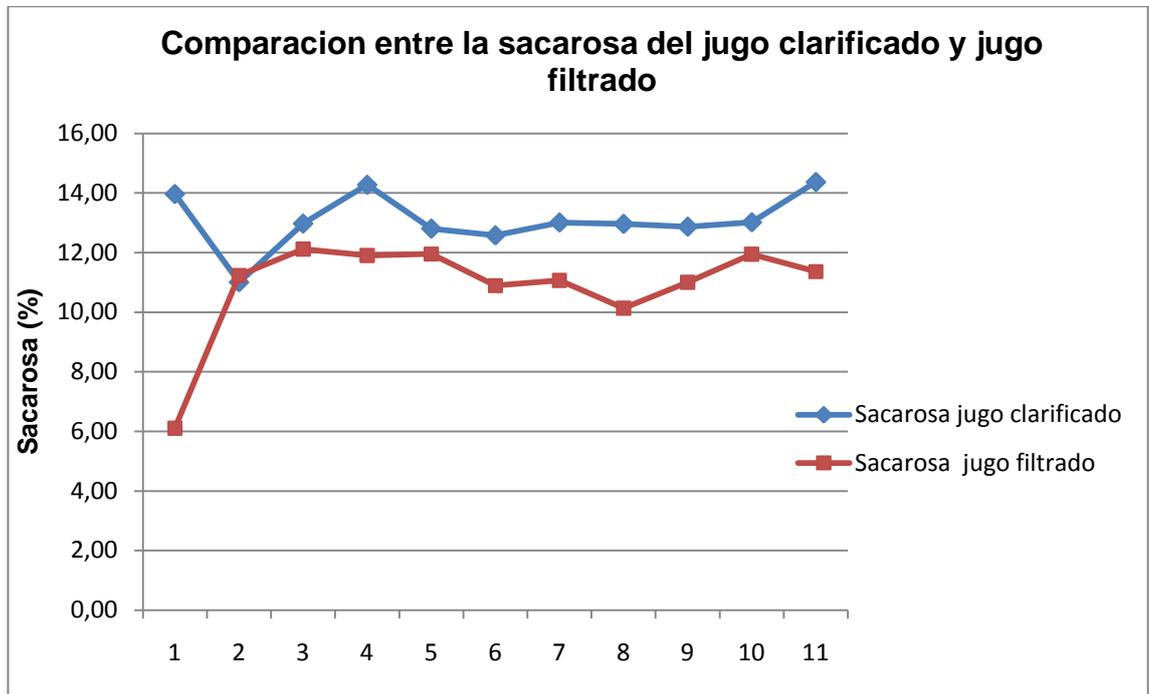


Grafico 3. Comparacion entre la pureza del jugo clarificado y jugo filtrado.

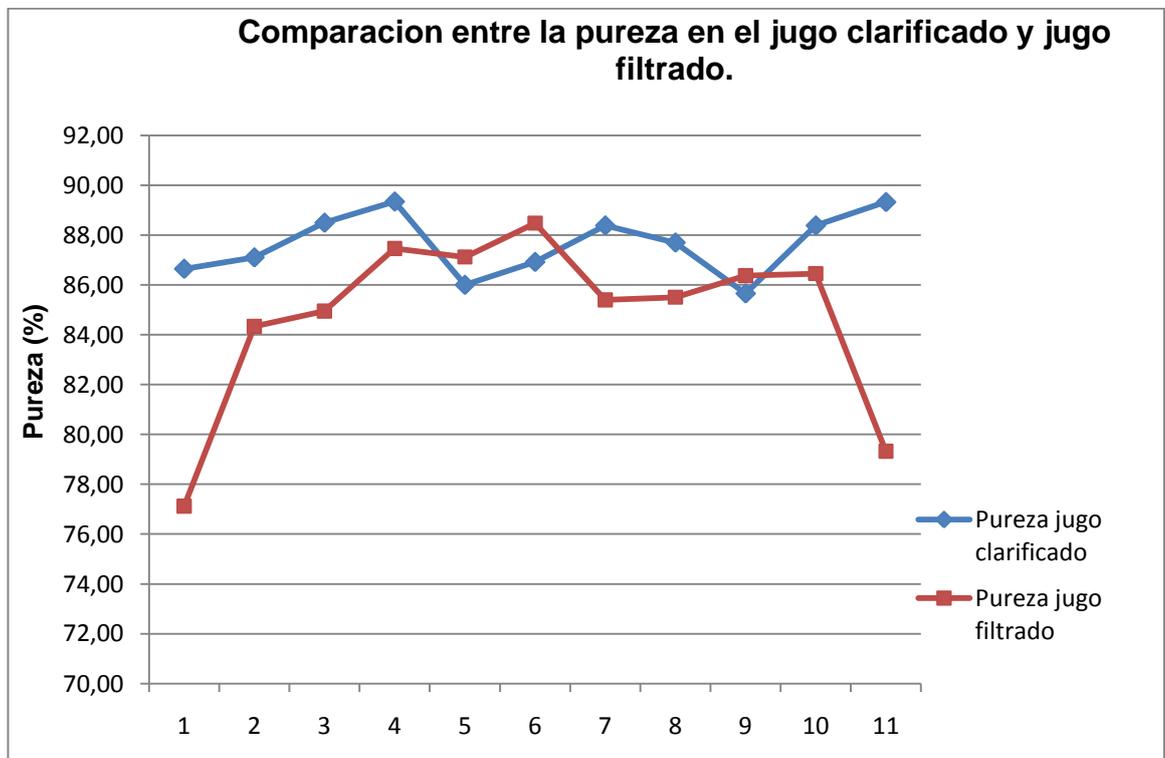


Grafico 4. Comparativo entre los grados brix del jugo clarificado y el jugo filtrado.

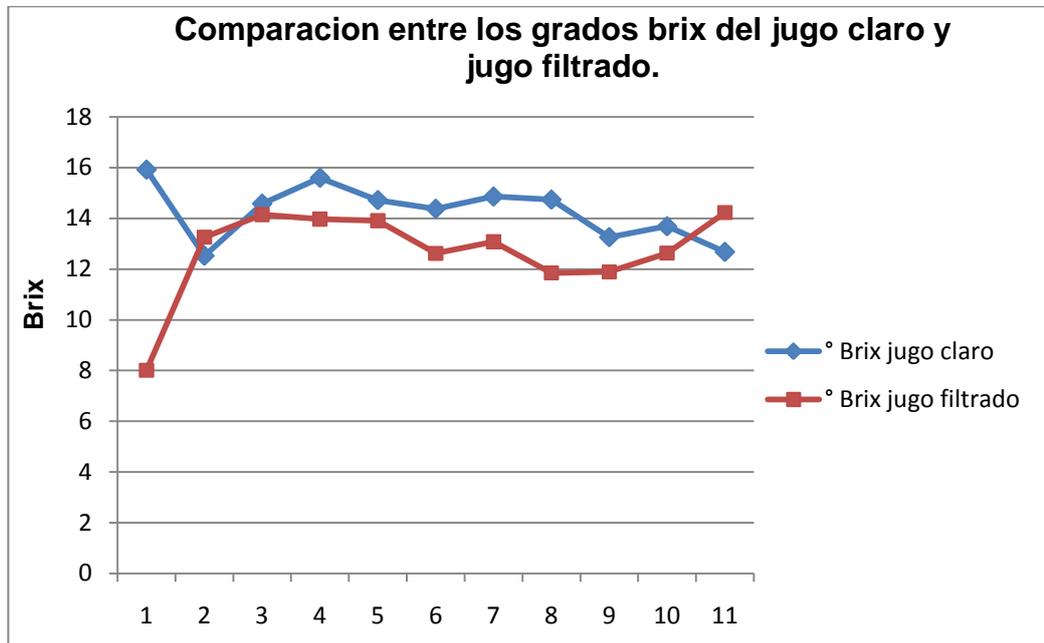
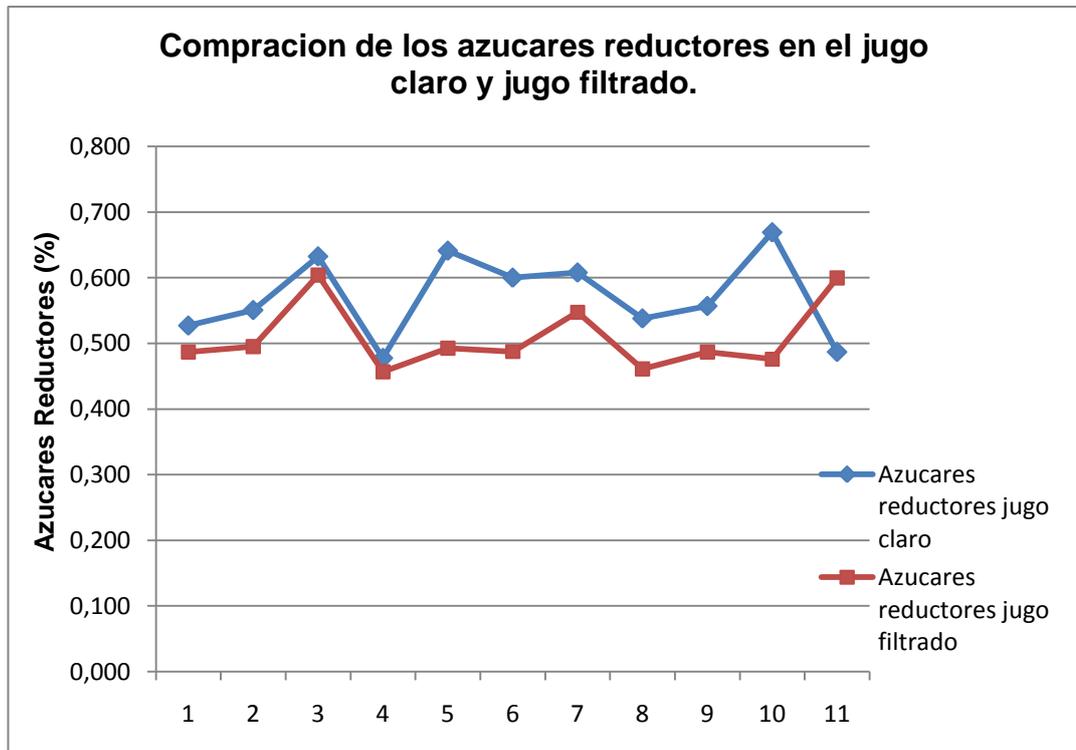


Grafico 5. Comparativo entre los azucares reductores presentes en el jugo claro y en el jugo filtrado.



Estadísticos descriptivos para jugo clarificado.

Tabla 3. Estadísticos descriptivos para el jugo claro.

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.	Varianza
pH	11	6,73	7,61	7,1036	,25781	0,066
Turbiedad (NTU)	11	78,50	109,00	92,9045	10,27939	105,666
° Brix	11	12,53	15,92	14,2691	1,10830	1,228
Sacarosa (%)	11	11,00	14,37	13,0755	0,92897	0,863
Pureza (%)	11	85,65	89,35	87,6300	1,26858	1,609
Azúcares Reductores (%)	11	0,48	0,67	0,5716	0,06305	0,004
Sedimentos en fase húmeda	11	9,40	12,09	10,0545	,98616	,973
N válido	11					

Estadísticos descriptivos para jugo filtrado.

Tabla 4. Estadísticos descriptivos para el jugo filtrado.

	N	Mínimo	Máximo	Media	Desv. típ.	Varianza
pH	11	6,48	11,69	7,4027	1,44689	2,094
Turbiedad (NTU)	11	1426,00	1968,00	1711,091	181,7858	33046,09
° Brix	11	8,01	14,23	12,6909	1,77097	3,136
Sacarosa (%)	11	6,11	12,11	10,8818	1,69003	2,856
Pureza (%)	11	77,12	88,48	84,7727	3,48261	12,129
Azúcares Reductores (%)	11	0,46	0,60	0,5100	0,05040	0,003
Sedimentos en fase húmeda	11	9,52	13,32	10,7818	1,04126	1,084
N válido	11					

Como se puede observar en los gráficos elaborados, las propiedades fisicoquímicas de los dos fluidos estudiados tiene propiedades similares, excepto por la turbiedad, lo cual es lógico, ya que el jugo filtrado presenta grandes cantidades de Bagacillo, que al someterse este material a la clarificación podrá disminuir la turbiedad, respecto al pH en el jugo turbio presenta un valor máximo de 11,69, este valor de pH debe (disminuir) cambiar en el momento de la clarificación dado a que se adicionaría al proceso ácido fosfórico para poder realizar la clarificación.

La variación de grados brix mostrada no es significativa, ya que el líquido no se está sometiendo a ningún tipo de calentamiento durante la filtración de los sedimentos del jugo claro, los grados brix del jugo filtrado al someterse al proceso de clarificación podrían aumentar un poco, dado a que este fluido se calentara, aumentara 20-30°C su temperatura, para poder generar la clarificación, de no ser así, la clarificación será deficiente y se deberá recircular el jugo filtrado clarificado, esta situación puede suceder fácilmente ya que el sistema de calentamiento que se tiene a disposición es un intercambiador de placas, muy pequeño que no soporta el flujo de jugo filtrado que le entra, una posible solución a este inconveniente es la implantación de otro intercambiador de calor de coraza y tubos que posee el Ingenio Risaralda S.A, que anteriormente era usado para el calentamiento de masas, este intercambiador se encuentra fuera de uso desde hace mas de 5 años, y se busca adecuarlo para ser utilizado en la clarificación de jugo filtrado, para poder conocer si esto era posible se realizo una prueba de bombeo, con agua a presión durante 1 hora para probar que los tubos del intercambiador no poseían fugas, a continuación se comentan las propiedades del intercambiador de coraza y tubos, y las propiedades del fluido a calentar.

Tabla 5. Partes, cantidad y área que conforma el intercambiador de coraza y tubos.

Partes.	Cantidad.	Área. (m²)
Numero de <i>tubos</i>	96	30,03
diámetro exterior	0,0445m	
longitud tubos	2,24m	
Numero de <i>codos</i>	84	2,22
Longitud de codos	0,2598m	
Numero de <i>aletas</i>	9504	154,45
Longitud de aletas	0,095m	
diámetro orificio	0,0445m	
Calibre de al lamina	0,003175m	
Área total de Transferencia		186,7

Medidas
Ancho 138 m
Largo 266m
Alto 298 m

Altura del Banco de tubos 0,91m (35,83 pulg)

Ancho del Banco de Tubos 1,199m (47,24 pulg)

Tabla 6. Características del Jugo filtrado

Características del fluido. (Jugo Filtrado)	
Cp. jugo filtrado	0,936 KJ/Kg °C
Densidad	1,0466 g/mL
Flujo Volumétrico	30 m ³ /h
Flujo másico	31398 Kg/h
Calor Sensible.	940432,896 KJ/h
	890589,9525 BTU/h
Temperatura media logarítmica	70,15 °F
Coeficiente global de transferencia de calor	3,1581 BTU/ft ² h °F
	18,0387 W/m ² °C
Área necesaria para que se dé la transferencia de calor.	703,793 m ²

Área total de transferencia de Calor 4000 ft² = 371,612 m²

De esta manera se deja como propuesta el rediseño del intercambiador de coraza y tubos que pueda cumplir con estos requisitos para el fluido.

También se deja como sugerencia continuar con la caracterización fisicoquímica del jugo filtrado, ya que este tipo de análisis permite conocer el tipo de fluido que se va a tratar, ayudando así a la correcta dosificación de los insumos, ya que estos dependen de las características del jugo filtrado y clarificado.