



UNIVERSIDAD NACIONAL
"PEDRO RUIZ GALLO"
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
E INDUSTRIAS ALIMENTARIAS



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

**"DETERMINACIÓN DEL EFECTO DEL
TIEMPO Y TEMPERATURA DE
CRISTALIZACIÓN SOBRE LA PUREZA DE
LA MIEL DE TERCERA EN EL PROCESO DE
ELABORACIÓN DE AZÚCAR RUBIA
DOMÉSTICA"**

**PARA OPTAR EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTADO POR:

Bach. YOHANA MILAGROS CÉSPEDES VERONA

Bach. GUSTAVO ADOLFO INOQUIO GARCÍA

ASESORADO POR:

Ing. PEDRO ÁNGELES CHERO

LAMBAYEQUE - PERÚ
2015



**UNIVERSIDAD NACIONAL
"PEDRO RUIZ GALLO"
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
E INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

**"DETERMINACIÓN DEL EFECTO DEL
TIEMPO Y TEMPERATURA DE
CRISTALIZACIÓN SOBRE LA PUREZA DE
LA MIEL DE TERCERA EN EL PROCESO DE
ELABORACIÓN DE AZÚCAR RUBIA
DOMÉSTICA"**

**PARA OPTAR EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO**

PRESENTADO POR:

Bach. YOHANA MILAGROS CÉSPEDES VERONA

Bach. GUSTAVO ADOLFO INOQUIO GARCÍA

ASESORADO POR:

Ing. PEDRO ÁNGELES CHERO

**LAMBAYEQUE – PERU
2015**



**UNIVERSIDAD NACIONAL
"PEDRO RUIZ GALLO"
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
E INDUSTRIAS ALIMENTARIAS**



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA QUÍMICA

TESIS

**"DETERMINACIÓN DEL EFECTO DEL
TIEMPO Y TEMPERATURA DE
CRISTALIZACIÓN SOBRE LA PUREZA DE
LA MIEL DE TERCERA EN EL PROCESO DE
ELABORACIÓN DE AZÚCAR RUBIA
DOMÉSTICA"**


**PARA OPTAR EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO**

APROBADO POR:


M.Sc. Ing. Ronald Gutiérrez Moreno
Presidente


Ing. Gerardo Santamaría Baldera
Vocal,


M.Sc. Ing. Isabel Nevado Rojas
Secretario


Dr. Ing. Pedro Ángeles Chero
Asesor

DEDICATORIA

A Dios, por haberme dado la vida para lograr mis objetivos, por su amor incondicional y por su bendición en cada decisión que realizo.

A la Virgen María, por su infinita misericordia y por siempre estar conmigo en los momentos más difíciles dando su amor de madre.

A mi mamá Liliana, por haberme apoyado en todo momento, por sus consejos, por sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, por ser la persona que me enseñó a ser quien soy y por su amor incondicional.

A mi papá Gustavo, por su apoyo constante en mi carrera y por su aliento para seguir alcanzando mis objetivos.

A mis abuelitos, Olegario y Juana por ser fuente de motivación y por su apoyo constante.

A mi tía Ana por alentarme cada día en ser mejor ser humano.

A mi tío Wilfredo por sus sabios consejos.

A mi hermano Juan por tu apoyo incondicional.

A mis familiares y a quienes se sumaron a mi vida para hacerme compañía con sus sonrisas de ánimo, en especial a ti Yohana, porque a lo largo de este trabajo aprendimos que nuestras diferencias se convierten en riqueza cuando existe respeto y verdadera amistad.

Gustavo Adolfo Inoquio García.

DEDICATORIA

A mi Flaquito lindo por brindarme tantas cosas, por permitirme conocer a gente tan buena, porque aunque muchas veces renegué porque las cosas no salían como las había planeado, me demostró que Él tenía mejores cosas planeadas para mí y en el tiempo preciso.

A mis padres Luis Céspedes y Yojana Verona porque siempre me enseñaron que la vida no es fácil, me enseñaron a valorar las cosas que tenía, que en la vida uno siempre debe ponerse retos y sueños y que uno debe de luchar para poder cumplirlos, gracias por su sacrificio que hacían para yo poder educarme, gracias por su amor que siempre me brindan, los amo.

A mis hermanas Mavila y Marisol que siempre han estado a mi lado, brindándome su apoyo, muchas veces poniéndose en el papel de madre.

A mi familia en general porque me han brindado su apoyo incondicional y por compartir conmigo buenos y malos momentos.

Yohana Céspedes Verona.

AGRADECIMIENTO

Gracias de todo corazón a los trabajadores de la Empresa AGROPUCALA, especialmente a los señores del área de cocimientos, porque me ayudaron en poder realizar la tesis, me ayudaron hacer fácil lo difícil, gracias por su paciencia, aliento, motivación, colaboración, amistad, enseñanzas, anécdotas, por todo lo que me han brindado, todo ello está guardado en mi corazón y aunque he ido por otro camino, tengan por seguro que siempre los recuerdo con mucho cariño, respeto, estima, aprecio, consideración y admiración, porque me enseñaron que no se necesita tener una profesión, grado, título, maestría o doctorado para ser un gran ser humano y recuerden que mi éxito con la tesis es el éxito de ustedes, porque ustedes son parte de ella.

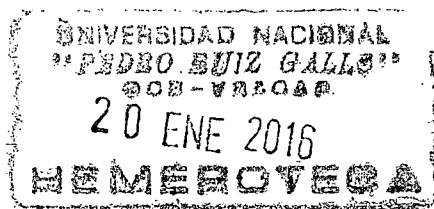
Gracias al Ing. Pedro Ángeles Chero por aceptar ser el asesor de la tesis, gracias por sus conocimientos, orientaciones y enseñanzas en poder desarrollar la tesis de investigación, sin su colaboración este trabajo hubiera sido mucho más largo y complicado.

Gracias a los profesores Manuel Hurtado y Emma Noblecilla por su apoyo desinteresado en brindarnos sus conocimientos en la parte de estadística y sobre todo gracias por la paciencia para resolver las miles de preguntas que tenía, porque la parte de analizar los datos se me hizo complicado pero con su ayuda todo fue más fácil.

Gracias a nuestro jurado de tesis, Ing. Isabel Nevado, Ing. Gerardo Santamaría y el Ing. Ronald Gutiérrez por sus aportes en la realización de la tesis, cada observación realizada fue oportuna porque nos ayudó a mejorar la tesis de investigación, muchas gracias por incentivarnos a prepararnos muy bien para defenderla el día de la sustentación.

Gracias al Ing. César Monteza, decano de nuestra facultad FIQIA, por apoyarnos siempre, a la Srta Rosa por ayudarnos en guiarnos siempre en la presentación de los documentos y sobre todo por agilizarlos siempre y a la Téc. Kelly por su apoyo incondicional.

Gracias a mis amigos de la universidad, el código, por los buenos momentos que vivimos juntos, en esa aventura de formarnos como ingenieros químicos.



ÍNDICE

| | |
|---|----|
| RESUMEN | 9 |
| ABSTRACT | 10 |
| INTRODUCCION | 11 |
| CAPITULO I | 13 |
| ASPECTOS GENERALES | 13 |
| 1.1 REALIDAD PROBLEMÁTICA | 14 |
| 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 15 |
| 1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA | 16 |
| 1.4 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL ESTUDIO | 16 |
| 1.5 OBJETIVOS | 17 |
| 1.5.1 Objetivo General..... | 17 |
| 1.5.2 Objetivos Específicos..... | 17 |
| CAPITULO II | 18 |
| FUNDAMENTO TEÓRICO | 18 |
| 2.1 EMPRESA AGROPUCALÁ S.A.A. | 19 |
| 2.1.1 Misión..... | 19 |
| 2.1.2 Visión..... | 19 |
| 2.2 LA CAÑA DE AZÚCAR | 21 |
| 2.2.1 Constituyentes de la caña de azúcar..... | 22 |
| 2.3 PROCESO DE ELABORACIÓN DE AZÚCAR | 24 |
| 2.3.1 Recepción y Preparación de la caña..... | 24 |
| 2.3.2 Extracción..... | 24 |
| 2.3.3 Encalado..... | 25 |
| 2.3.4 Clarificación de los jugos..... | 25 |
| 2.3.5 Evaporación..... | 26 |
| 2.3.6 Cocimiento y Cristalización..... | 26 |
| 2.3.7 Centrifugación..... | 27 |
| 2.3.8 Envasado..... | 28 |
| 2.4 PROCESO DE CRISTALIZACIÓN DE MASA COCIDA C | 33 |
| 2.4.1 Objetivo de la Cristalización..... | 33 |
| 2.4.2 Mecanismo de cristalización..... | 34 |
| A. Sobresaturación..... | 34 |

| | |
|---|-----------|
| B. Formación de núcleos cristalinos. | 34 |
| C. Crecimiento del cristal..... | 35 |
| 2.4.3 Fases del proceso de cristalización | 35 |
| A. Semillación para un pie de templa de masa cocida C | 35 |
| B.Elaboración de templa de masa cocida C | 36 |
| C.Cristalización por enfriamiento..... | 39 |
| 2.4.4 Subproducto | 41 |
| 2.4.5 Equipos | 43 |
| A. Vacumpanes..... | 43 |
| B. Cristalizador de Blanchard | 43 |
| 2.4.6 Operación de los cristalizadores | 46 |
| 2.5 AGOTAMIENTO DE MASA COCIDA C | 50 |
| 2.5.1 Factores que influyen en el proceso de cristalización | 50 |
| A. Sobresaturación..... | 50 |
| B. Viscosidad | 52 |
| C. Rendimiento de cristales..... | 53 |
| D. Tamaño del cristal..... | 54 |
| E. Uniformidad de los cristales | 55 |
| F. Pureza de masa cocida C | 56 |
| G. Impurezas..... | 56 |
| H. Temperatura enfriamiento..... | 57 |
| I. Tiempo de residencia en los cristalizadores | 58 |
| J. Velocidad de enfriamiento | 59 |
| K. Temperatura de Calentamiento..... | 60 |
| L.Velocidad de agitación | 60 |
| CAPITULO III | 68 |
| MATERIALES Y MÉTODOS | 68 |
| 3.1 DELIMITACIÓN DEL CAMPO DE ESTUDIO | 69 |
| 3.1.1 Método empleado en la investigación | 69 |
| 3.1.2 Tipo de investigación..... | 69 |
| 3.1.3 Diseño de la investigación..... | 69 |
| 3.2 LOCALIZACIÓN Y DURACIÓN | 69 |
| 3.3POBLACIÓN Y MUESTRA ESTADÍSTICA DE ESTUDIO | 70 |
| 3.4 VARIABLES DE ESTUDIO | 71 |

| | |
|---|------------|
| 3.5 MATERIALES..... | 71 |
| 3.6 METODOLOGÍA..... | 71 |
| 3.6.1 Metodología para el muestreo | 71 |
| i. Muestras seleccionadas..... | 71 |
| ii. Puntos de muestreo..... | 72 |
| iii. Periodo de muestreo y análisis de laboratorio..... | 72 |
| iv. Metodología de muestreo..... | 72 |
| 3.6.2 Diseño Experimental | 73 |
| 3.6.3 Hipótesis..... | 73 |
| 3.6.4 Métodos y Variables de estudio en el análisis de laboratorio..... | 76 |
| i. Variables Fisicoquímicas | 76 |
| ii. Métodos de análisis de laboratorio..... | 76 |
| 3.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO | 82 |
| CAPITULO IV | 83 |
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 83 |
| CAPITULO V | 115 |
| CONCLUSIONES | 115 |
| CAPITULO VI..... | 117 |
| RECOMENDACIONES..... | 117 |
| CAPITULO VII..... | 119 |
| REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA | 119 |
| CAPITULO VIII | 123 |
| APENDICE..... | 123 |
| CAPITULO VIII..... | 128 |
| ANEXOS | 128 |

LISTA DE CUADROS

| | |
|--|-----------|
| CUADRO N° 2.1.- Composición de la caña de azúcar | 23 |
| CUADRO N° 2.2.- Composición de las masas cocidas y mieles | 31 |
| CUADRO N° 2.3.- Parámetros de operación de evaporadores | 32 |
| CUADRO N° 2.4.- Parámetros de operación de tachos | 32 |
| CUADRO N° 2.5.- Valores promedios de las variables fisicoquímicas de masa cocida C..... | 40 |
| CUADRO N° 2.6.- Valores promedios de los parámetros de operación en el control de masa cocida C | 40 |
| CUADRO N° 2.7.- Composición química de la melaza de caña de azúcar | 42 |
| CUADRO N° 2.8.- Aprovechamiento de la melaza de caña de azúcar..... | 42 |
| CUADRO N° 2.9.- Parámetros de operación en los cristalizadores | 50 |
| CUADRO N° 2.10.- Valores de sobresaturación recomendado en la masa cocida C | 61 |
| CUADRO N° 2.11.- Límite máximo del contenido de cristales en la masa cocida C | 62 |
| CUADRO N° 2.12.- Tamaño en milímetros recomendados para los cristales de masa cocida C | 62 |
| CUADRO N° 2.13.- Valores de temperatura mínima de enfriamiento recomendada en los cristalizadores | 63 |
| CUADRO N° 2.14.- Velocidad de enfriamiento en cristalizadores de acuerdo al tiempo de retención | 63 |
| CUADRO N° 2.15.- Valores de temperatura de calentamiento recomendado en los cristalizadores..... | 64 |
| CUADRO N° 2.16.- Valores de velocidad de agitación en los cristalizadores | 65 |
| CUADRO N° 2.17.- Efectos de los factores que influyen en el proceso de cristalización | 66 |
| CUADRO N° 2.18.- Efectos de la variación de la temperatura..... | 67 |
| CUADRO N° 3.1.- Métodos standarts de los análisis empleados..... | 82 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|-----------|
| FIGURA N° 2.1.- AGROPUCALA S.A.A | 20 |
| FIGURA N° 2.2.- FÁBRICA AGROPUCALA S.A.A | 20 |
| FIGURA N° 2.3.- Evaporadores de múltiple efecto | 29 |
| FIGURA N° 2.4.- Vacumpanes | 29 |
| FIGURA N° 2.5.- Sistema de cocimiento de tres templeas | 30 |
| FIGURA N° 2.6.- Etapa para realizar la siembra..... | 37 |
| FIGURA N° 2.7.- Cristales pequeños de azúcar | 37 |
| FIGURA N° 2.8.- Sobresaturación y Cristalización | 38 |
| FIGURA N° 2.9.- Diseño de un Vacumpan | 45 |
| FIGURA N° 2.10.- Batería de Cristalizadores | 46 |
| FIGURA N° 2.11.- Sobresaturación y Cristalización | 61 |
| FIGURA N° 3.1.- Diagrama de Bloques del procedimiento experimental | 75 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|------------|
| TABLA N° 4.1.- Variación de Temperatura, Tiempo y Pureza de miel de tercera en el Lado A | 91 |
| TABLA N° 4.2.- Variación de Temperatura, Tiempo y Pureza de miel de tercera en el Lado B | 92 |
| TABLA N° 4.3.- Resumen del modelo de regresión lineal múltiple en el Lado A ... | 93 |
| TABLA N° 4.4.- Resumen del modelo de regresión lineal múltiple en el Lado B ... | 93 |
| TABLA N° 4.5.- ANOVA en el Lado A | 94 |
| TABLA N° 4.6.- ANOVA en el Lado B | 94 |
| TABLA N° 4.7.- Coeficiente en el Lado A | 96 |
| TABLA N° 4.8.- Coeficiente en el Lado B | 96 |
| TABLA N° 4.9.- Estadísticos sobre los residuos en el Lado A | 97 |
| TABLA N° 4.10.- Estadísticos sobre los residuos en el Lado B | 97 |
| TABLA N° 4.11.- Prueba de Kolmogorov – Smirnov en el Lado A..... | 101 |
| TABLA N° 4.12.- Prueba de Kolmogorov – Smirnov en el Lado B..... | 101 |
| TABLA N° 4.13.- Correlación entre las variables estudiadas en el Lado A | 110 |

| | |
|---|-----|
| TABLA N° 4.14.- Correlación entre las variables estudiadas en el Lado B | 110 |
| TABLA N° 4.15.- Diagnóstico de Colinealidad en el Lado A | 111 |
| TABLA N° 4.16.- Diagnóstico de Colinealidad en el Lado B | 111 |
| TABLA N° 4.17.- Comparación entre Modelo de regresión simple Temperatura vs Pureza y Modelo de regresión múltiple Temperatura, Tiempo vs Pureza del Lado A | 112 |
| TABLA N° 4.18.- Comparación entre Modelo de regresión simple Tiempo vs Pureza y Modelo de regresión múltiple Temperatura, Tiempo vs Pureza del Lado A..... | 112 |
| TABLA N° 4.19.- Comparación entre Modelo de regresión simple Temperatura vs Pureza y Modelo de regresión múltiple Temperatura, Tiempo vs Pureza del Lado B | 114 |
| TABLA N° 4.20.- Comparación entre Modelo de regresión simple Tiempo vs Pureza y Modelo de regresión múltiple Temperatura, Tiempo vs Pureza del Lado B | 114 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|---|-----|
| GRÁFICO N° 4.1 Dispersión 3D de Pureza vs Temperatura, Tiempo en el Lado A | 98 |
| GRÁFICO N° 4.2 Superficie de Pureza vs Temperatura, Tiempo en el Lado A | 98 |
| GRÁFICO N° 4.3 Dispersión 3D de Pureza vs Temperatura, Tiempo en el Lado B | 99 |
| GRÁFICO N° 4.4 Superficie de Pureza vs Temperatura, Tiempo en el Lado A | 99 |
| GRÁFICO N° 4.5 Histograma de residuos tipificados - Lado A | 102 |
| GRÁFICO N° 4.6 Histograma de residuos tipificados - Lado B | 102 |
| GRÁFICO N° 4.7 P-P normal de regresión Residuos tipificados - Lado A | 103 |
| GRÁFICO N° 4.8 P-P normal de regresión Residuos tipificados - Lado B | 103 |
| GRÁFICO N° 4.9 Diagrama de dispersión de pronósticos tipificados por residuos tipificados en el Lado A..... | 105 |
| GRÁFICO N° 4.10 Diagrama de dispersión de pronósticos tipificados por residuos tipificados en el Lado B..... | 105 |
| GRÁFICO N° 4.11 Regresión parcial Pureza vs Temperatura en el Lado A | 106 |
| GRÁFICO N° 4.12 Regresión parcial Pureza vs Tiempo en el Lado A..... | 106 |
| GRÁFICO N° 4.13 Regresión parcial Pureza vs Temperatura en el Lado B | 107 |
| GRÁFICO N° 4.14 Regresión parcial Pureza vs Tiempo en el Lado B..... | 107 |

| | |
|--|------------|
| GRÁFICO N° 4.15 Pureza Vs Temperatura de cristalización en el Lado A..... | 113 |
| GRÁFICO N° 4.16 Pureza Vs Tiempo de cristalización en el Lado A | 113 |
| GRÁFICO N° 4.17 Pureza Vs Temperatura de cristalización en el Lado B..... | 115 |
| GRÁFICO N° 4.18 Pureza Vs Tiempo de cristalización en el Lado B | 115 |

LISTA DE ANEXOS

| | |
|--|------------|
| ANEXO A CRISTALIZADOR BLANCHARD | 129 |
| ANEXO B PUNTOS DE MUESTREO..... | 130 |
| ANEXO C FILTRO DE NUTSCH | 131 |
| ANEXO D EQUIPOS DE LABORATORIOS EMPLEADOS EN LOS ANÁLISIS FISICOQUÍMICOS..... | 132 |
| ANEXO E CORRECCIONES DE TEMPERATURA PARA LA LECTURA DE BRUX HIDROMETRO (Calibrado a 20°C) | 133 |
| ANEXO F RESULTADOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL EN EL ÁREA DE CRISTALIZACIÓN EN LA EMPRESA AGROPUCALÀ | 134 |
| TABLA F.1 Características de la Masa Cocida al inicio del proceso en Lado A | 134 |
| TABLA F.2 Características de la Masa Cocida al final del enfriamiento en Lado A | 135 |
| TABLA F.3 Características de la Masa Cocida al inicio del proceso en Lado B | 136 |
| TABLA F.4 Características de la Masa Cocida al final del enfriamiento en Lado B | 137 |

RESUMEN

El presente trabajo de investigación, pone de manifiesto uno de los principales problemas que presenta Agropucala S.A.A, la pérdida de azúcar en la miel de tercera, y que hasta ahora no puede controlar, es por eso que este trabajo tiene por objetivo determinar el efecto del tiempo y la temperatura de cristalización sobre la caída de pureza de la miel de tercera en el proceso de elaboración del azúcar rubia doméstica.

La fase experimental tuvo una duración efectiva de seis semanas entre los meses de febrero y marzo del 2014, la cual se desarrolló en el área de cocimiento y cristalización de la fábrica, lugar donde se instaló el filtro de Nutsch, se determinó dos puntos de muestreo, uno en la descarga de la masa cocida de los tachos de tercera y el otro punto de muestreo es el último cristizador de la batería del Lado A y Lado B, a cada muestra se le tomó la temperatura in situ y el tiempo de inicio y final del agotamiento de la masa cocida C, además las muestras de miel de tercera obtenidas se le realizó el análisis de brix, pol y pureza.

El número de muestras realizadas fue de 53 de masa cocida C, de las cuales 26 se obtuvieron del lado A y 27 del Lado B, los resultados experimentales fueron procesados utilizando el programa estadístico SPSS, a los datos experimentales se le realizó una regresión múltiple paso a paso tomando como variable dependiente la caída de pureza y como independientes la variación de temperatura y tiempo de cristalización, se obtuvo que los coeficientes de correlación múltiple R^2 son 87.7% y 94.4% para el Lado A y Lado B respectivamente, lo que nos permite comprobar que las variables independientes son significativas para la variable dependiente, además obtuvimos una ecuación lineal múltiple con las tres variables estudiadas.

La mayor caída de pureza en el Lado A es de 5.86 puntos trabajando con una temperatura de enfriamiento de 36°C y un tiempo cristalización de 23.83 horas y para el Lado B la mayor caída de pureza es de 4.97 puntos trabajando a una temperatura de enfriamiento de 37°C y un tiempo cristalización de 33.83 horas.

Palabras Clave: Cristalización, melaza, caída de pureza, agotamiento.

ABSTRACT

The present research, highlights one of the main problems Agropucala SAA, the loss of sugar syrup third, and so far can not control, that is why this work is to determine the effect of time and temperature of crystallization on the fall of pure honey third in the process of developing the domestic brown sugar.

The pilot phase had an effective duration of six weeks between February and March 2014, which developed in the area of cooking and crystallization of the factory, where the filter is installed Nutsch was determined two points of sampling one in the discharge of the cooked dough cans and other third sampling point is the last crystallizer battery Side A and Side B, each sample was taken in situ temperature and start time and end of the exhaust C massecuite also honey samples obtained underwent third analysis brix, pol and purity.

The number of samples taken was 53 massecuite C, of which 26 were obtained from side A and 27 Side B, the experimental results were processed using the SPSS statistical program, the experimental data was performed a multiple regression step step taking as the dependent variable and falling purity as independent variation of temperature and crystallization time, it was found that the multiple correlation coefficients R² are 87.7% and 94.4% for Side a and Side B respectively, allowing us check that the independent variables are significant for the dependent variable, plus we got a multiple linear equation with three variables studied.

The biggest drop in purity on Side A is 5.86 points working with a cooling temperature of 36 ° C and a time of 23.83 hours and crystallization for Side B the biggest drop of 4.97 points purity is working at a cooling temperature of 37 ° C and crystallization time of 33.83 hours.

Keywords: Crystallization, molasses, falling purity, exhaustion.

INTRODUCCION

Ingenio Agropucala S.A.A. es uno de los cuatro ingenios azucareros que forman parte de la agroindustria azucarera de Lambayeque.

Son muchos los factores que afectan a la industria azucarera, dentro de ellos la perdida de azúcar en la miel de tercera, por lo cual se han llevado a cabo muchos trabajos de investigación en Cuba, El Salvador y Perú para buscar contrarrestar estas pérdidas, de las cuales hemos empleado para nuestra investigación, ellas son: "Propuesta de alternativa de reducción de pérdidas de sacarosa en un ingenio azucarero", "Disminución de Perdidas de Sacarosa en la Elaboración de Meladura en un Ingenio Azucarero", "Los sistemas de masas cocidas y el agotamiento de las mieles en las condiciones actuales de materias primas", "Caracterización industrial del proceso de cristalización de azúcar por enfriamiento", "Agotamiento de mieles en la industria azucarera", "Importancia de la conservación de los azúcares reductores en la relación con la capacidad de agotamiento" y "Efecto del pH sobre las pérdidas de sacarosa en la etapa de clarificación de la empresa agroindustrial TUMÁN S.A.A".

Es por eso que este trabajo tiene por objetivo determinar la influencia del tiempo y la temperatura de cristalización sobre la pureza de la miel de tercera en el proceso de elaboración del azúcar rubia doméstica, así como describir los parámetro de operación, determinar los puntos de muestreo, evaluar los datos realizando un buen análisis estadístico y determinar el tiempo y a temperatura que presente menos caída de pureza.

Este análisis se basó en definir puntos de muestreo y a partir de aquí proporcionar las muestras al Laboratorio para su respectivo análisis fisicoquímico, el cual consistió en dos puntos de muestro: en la descarga del Tacho y en la descarga del cristizador, también se tomó control de la temperatura de descarga del tacho así como el tiempo y la temperatura de descarga del Cristizador.

Para un buen estudio del efecto de las variables independientes sobre la dependiente se hizo un estudio ayudado del Software estadístico SPSS Statistics 22.

Llegamos a los siguientes resultados trabajando a una temperatura de enfriamiento de 36°C y un tiempo cristalización de 23.83 horas la mayor caída de pureza para el Lado A es de 5.86 puntos, y para el Lado B trabajando a una temperatura de enfriamiento de 37°C y un tiempo cristalización de 33.83 horas, la mayor caída de pureza es de 4.97 puntos, según esto podemos concluir que trabajando con un tiempo y temperatura igual o cercano a lo antes mencionado se pueden obtener muy buenos resultados; ayudados claro está de un buen análisis estadístico, en este caso nos sirvió de mucho ayuda el software antes mencionado, el cual nos permitió llegar a este resultado.

Es recomendable una buena política de enfriamiento, una buena lubricación, agregar al estudio otras variables que pueden influir en la caída de pureza, un buen análisis estadístico y considerar más puntos de muestreo.

Los Autores.

CAPITULO I

ASPECTOS

GENERALES

1.1 REALIDAD PROBLEMÁTICA

Actualmente las empresas azucareras están sujetas a constantes modificaciones con el objetivo de lograr un mayor rendimiento en la producción, y este puede verse afectado si no se realiza un buen manejo de la operación en las etapas y de los parámetros que intervienen; principalmente en las pérdidas de sacarosa, que deciden a gran medida la eficiencia técnico económica industrial.

A lo largo del proceso van a surgir cuatro puntos críticos donde se generan pérdidas que contrarrestan la eficiencia de la fábrica, puesto que van a constituir fugas de azúcar no recuperada. Estas pérdidas se pueden enumerar como siguen: Pérdidas en bagazo, Pérdidas en cachaza, Pérdidas indeterminadas y Pérdidas en miel final; esta última es el motivo de esta investigación ya que éste material aún contiene sacarosa, por lo tanto en la industria azucarera se busca que su contenido de sacarosa sea el mínimo que se pueda obtener mediante la tecnología convencional, debido a esto, el agotamiento de la miel final es uno de los principales objetivos e indicadores en la industria azucarera

Dado que las mieles A y B obtenidas luego de la operación de centrifugación son recirculadas hacia la fábrica, la sacarosa remanente en éstas mieles puede recuperarse mediante cristalización en la operación de los tachos, la importancia del trabajo realizado en los cristalizadores para el proceso de masa cocida de tercera es fundamental, debido a que esta operación determina la cantidad de sacarosa que se pierde en la miel final, la cual no puede recuperarse en el ingenio.

Es necesario recordar que de la caída total de pureza obtenida, los tachos son responsables del otro 60% a 70% y los cristalizadores son responsables de un 30%, es verdad que los cristalizadores no pueden corregir un mal trabajo de los tachos, pero el trabajo eficiente de los tachos si puede ser arruinando por el trabajo deficiente de los cristalizadores.

La falta de supervisión en los cristalizadores puede resultar mieles de alta pureza, perdidas innecesarias de azúcar, volúmenes altos de miel final, purga deficiente en las centrifugas C y baja pureza en la magma, lo cual significa

menor producción de azúcar, aumento los costos de producción y pérdidas económicas para la empresa.

Basado en lo anterior, este trabajo de investigación muestra una recopilación bibliográfica sobre los factores más influyentes del agotamiento de mieles.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una de las partes más importantes del proceso de producción de azúcar de calidad en la industria azucarera es el proceso de cristalización.

Son muchos los factores que se deben controlar para realizar un agotamiento eficiente, tanto en tacho como en cristalizadores, por lo cual se han llevado a cabo muchos trabajos de investigación y se han hecho esfuerzos para desarrollar técnicas y métodos que permitan obtener cristales uniformes, así como aumentar el agotamiento de las masas de tercera; sin embargo las dificultades en el agotamiento, en el ámbito nacional, se han incrementado en las últimas zafras. Podrán plantearse que las condiciones climatológicas han sido adversas durante la cosecha y podrán referirse problemas generales y particulares en cada caso, pero lo cierto es que los resultados se empeoran cada vez más en este campo y que las soluciones que hace unos años eran clásicas para los problemas de agotamiento ahora ya son inoperables, por lo cual se impone un análisis científico técnico que contemple soluciones que normalmente nunca se han utilizado tanto dentro como fuera de la fábrica.

La mayoría de los estudios y publicaciones relacionadas con el proceso de cristalización de la sacarosa, se asocian con buena lógica a los factores que inciden en el agotamiento de las mieles finales por concepto de los altos valores de las pérdidas en estas, es por ello que se considera conveniente la atención al control de las operaciones que forman parte del proceso de cristalización, aspecto que incide necesariamente sobre la eficiencia desde el punto de vista de la productividad y el agotamiento.

El presente trabajo de investigación busca determinar el efecto del tiempo y temperatura de cristalización sobre la caída de pureza de la miel final en el proceso de cristalización por enfriamiento en la Empresa Agro Pucalá S.A.A; con el objetivo de controlar mejor la operación del proceso, aumentar la

eficiencia que conlleve a lograr una mayor producción y que esto genere un mayor ingreso a la empresa azucarera.

1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cuál es el efecto que generan el tiempo y la temperatura de cristalización en la pureza de la miel de tercera en el proceso de elaboración de azúcar rubia doméstica?

1.4 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DEL ESTUDIO

El proyecto de investigación está orientada a evaluar la pureza de la miel final por efecto del tiempo y la temperatura en el proceso de la cristalización, lo que permitirá encontrar el valor óptimo de las variables de estudio, lo que permitirá buscar la solución más inmediata para realizar el control del problema de pérdidas de sacarosa en la miel final, una mejor eficiencia en la operación del ingenio azucarero.

Este trabajo va beneficiar principalmente a la Empresa Agro Pucalá S.A.A porque le permitirá demostrar que es capaz de reducir dichas pérdidas de sacarosa en la miel final realizando un buen manejo en la operación de agotamiento de masa de tercera, aumentar el rendimiento, producir la mayor cantidad posible de azúcar, y eso le generará una mayor ganancia y un crecimiento económico.

También va beneficiar a los trabajadores de la empresa, quienes van a realizar sus actividades motivados e incentivados en contribuir en el crecimiento de su empresa, lo cual generaría un buen clima laboral, además el desarrollo económico de la Empresa Agro Pucalá S.A.A contribuirá también en el bienestar de las familias de los trabajadores, beneficiando a la sociedad. La investigación y la innovación tecnológica son hoy en día los elementos más importantes que ayudaran al sector azucarero peruano lograr altos niveles de competitividad y así el país regrese a ser el productor referente a nivel internacional, en este trabajo se ha escogido estudiar un problema real que afecta a todas las empresas azucareras, como es el agotamiento de

masa de tercera, con la finalidad de contribuir a la mejora de la productividad y competitividad del sector.

El impacto positivo que generará esta investigación es incentivar a los estudiantes a seguir realizando estudios referentes a la búsqueda de solución de los problemas reales que afectan a las empresas azucareras, asimismo es útil para los investigadores, analistas y estudiantes que están en busca de información para fines de su investigación.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo General

Determinar el efecto que genera el tiempo y la temperatura de cristalización sobre la pureza de la miel de tercera en el proceso de elaboración de azúcar rubia doméstica.

1.5.2 Objetivos Específicos

- ✓ Describir los parámetros de operación de tiempo y temperatura de cristalización en la elaboración de azúcar rubia doméstica en la Empresa Agro Pucalá S.A.A.
- ✓ Determinar los puntos de muestreo de la masa de tercera en el proceso de cristalización
- ✓ Evaluar los datos obtenidos de los parámetros estudiados ayudado por un análisis estadístico.
- ✓ Determinar el tiempo y temperatura de cristalización que presente la mayor caída de pureza de la miel final (°Pza).

CAPITULO II

FUNDAMENTO

TEÓRICO

2.1 EMPRESA AGROPUCALÁ S.A.A

La Empresa AGROPUCALA S.A.A., es uno de los cuatro ingenios azucareros que forman parte de la agroindustria azucarera de Lambayeque, está situada en la parte norte de la costa peruana, en el distrito de Pucalá, provincia de Chiclayo, región Lambayeque, está abocada a la siembra y procesamiento de caña de azúcar y comercialización de productos derivados de la caña, como el azúcar, alcohol, melaza y bagazo.

Pucalá también es propietaria de una Planta de alcohol, con capacidad de 60 mil litros diarios, con proyección a 150 mil.

El bagazo es utilizado como combustible en las calderas de la fábrica, además de ser comercializado para la industria de papel, tableros y cartón prensando.

Los objetivos de la empresa es mejorar el proceso adquiriendo nueva maquinaria y modernizando la ya existente para alcanzar estándares de la más alta calidad. Así mismo, ampliar el área de siembra y lograr una paz laboral para el crecimiento de la empresa

2.1.1 Misión

"Producir y comercializar azúcar de caña y otros bienes de negocios, con estándares de calidad vinculados para la satisfacción de nuestros clientes mediante la optimización de los procesos, contando con colaboradores comprometidos y capacitados, logrando niveles de rentabilidad y competitividad global actuando con responsabilidad social y ambiental"

2.1.2 Visión

"Ser empresa líder y ejemplo de trabajo, productividad, calidad e impulsores del crecimiento económico del país, contribuyendo en la industrialización y comercialización del azúcar y otros bienes de negocio, a través de la excelencia en procesos de producción que permita competir exitosamente en el mercado global sin degradar el medio ambiente." (I)

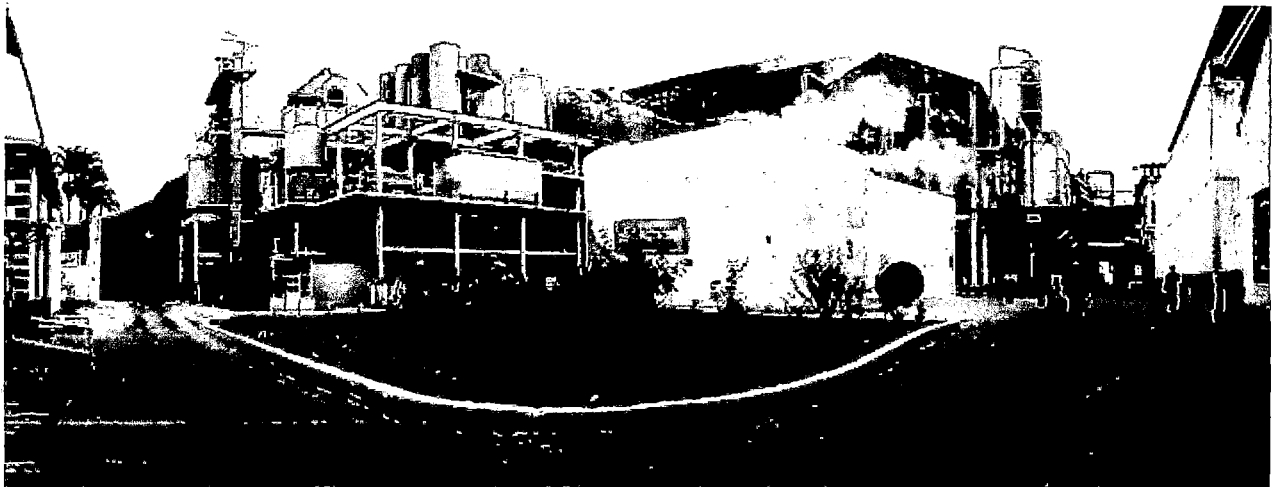
FIGURA N° 2.1.- AGROPUCALA S.A.A



Fuente: AGROPUCALA S.A.A

¡AZUCAR PUCALA... el dulce que mejor endulza tu vida!

FIGURA N° 2.2.- FÁBRICA AGROPUCALA S.A.A



Fuente: AGROPUCALA S.A.A

2.2 LA CAÑA DE AZÚCAR

La caña (*Saccharum officinarum*) tiene su origen genético en Nueva Guinea. La planta pertenece a la familia de las gramíneas (pastos).

Se desarrolla como cultivo intensivo en climas tropicales y subtropicales. Su reproducción es asexual por la propagación de trozo con una o dos yemas germinales (propagación vegetativa). Es cultivada varias veces al año y se corta en promedio cada 12 meses cuando ha alcanzado su madurez. (Villa, M.; 2008)

Tiene un tallo macizo de 2 a 5 metros de altura con 5 ó 6 cm. de diámetro. El sistema radicular lo compone un robusto rizoma subterráneo; El tallo acumula un jugo rico en sacarosa, compuesto que al ser extraído y cristalizado en el ingenio forma el azúcar. La sacarosa es sintetizada por la caña gracias a la energía tomada del sol durante la fotosíntesis. (Díaz, L; Portocarrero, E)

La producción de caña de azúcar no tiene una estacionalidad definida por tanto la siembra y la cosecha se realiza durante todo el año, permitiendo que los ingenios azucareros este abastecidos permanentemente de caña.

La caña de azúcar se siembra por medio de estacas que entierran en surcos; cada yema de la estaca produce una planta de la que nacen varios tallos que forman una cepa.

A medida que la planta se acerca a la madurez aumenta la sacarosa de los tallos y disminuyen los azúcares reductores (glucosa y fructosa). Cuando empiezan a formarse las cañas contienen muy poca sacarosa, predominando los azúcares reductores; a medida que van creciendo, los entrenudos inferiores van acumulando sacarosa.

Cuando la caña llega a la plenitud de madurez hay tanta sacarosa en los superiores como en los inferiores, pero si se sobrepasa el periodo óptimo de madurez, entonces las extremidades inferiores presentan menor contenido de sacarosa que los superiores.

No es necesario sembrar nuevamente la caña, después de cada cosecha (Zafra); las plantas nuevas nacen de las cepas que quedan en el terreno después que se cortan los tallos produciendo una segunda cosecha; y después de la misma forma se podrá obtener hasta seis cosechas.

Para determinar la madurez de las cañas es necesario realizar análisis continuos al periodo de madurez calentando y se analizan los jugos de las parte inferior, media y superior de los tallos de las muestras de caña por cosechar.

Antes de realizar el corte de las cañas, se queman para eliminar las hojas secas (Hojarascas). Con el corte manual de las cañas se cortan al ras del suelo porque la parte inferior contiene mayor riqueza y se elimina el cogollo por contener gran cantidad de azúcares reductores y poca sacarosa que causa trastornos en la elaboración de azúcar, la caña se arruma en montones, separada de cogollos y hojas que se eliminan, para ser cargada y transportadas en camiones hasta el ingenio (Paredes, K.; 2008). El contenido de azúcar (sacarosa) oscila entre 11 y 16%. (Asociación Naturland; 1ª edición; 2000)

La caña de azúcar constituye el cultivo de mayor importancia desde el punto de vista de la producción azucarera, además representa una actividad productiva y posee varios subproductos, entre ellos la producción de energía eléctrica derivada de la combustión del bagazo, alcohol de diferentes grados como carburante o farmacéutico. (Díaz, L; Portocarrero, E)

2.2.1 Constituyentes de la caña de azúcar

En términos generales, la composición química de la caña de azúcar es la resultante de la integración e interacción de varios factores que intervienen en forma directa e indirecta sobre sus contenidos, variando los mismos entre lotes, localidades, regiones, condiciones climáticas, variedades, edad de la caña, estado de madurez de la plantación, grado de despunte del tallo, manejo incorporado, periodos de tiempo evaluados, características fisicoquímicas y microbiológicas del suelo, grado de humedad (ambiente y suelo), fertilización aplicada y otros.

El tronco de la caña de azúcar está compuesto por una parte sólida llamada fibra y una parte líquida, el jugo, que contiene agua y sacarosa. En ambas partes también se encuentran otras sustancias en cantidades muy pequeñas. Ver CUADRO N° 2.1.

CUADRO Nº 2.1.- Composición de la caña de azúcar

| Constituyente químico | Porcentaje |
|------------------------------|---------------|
| <u>En los tallos:</u> | |
| Agua | 73 – 76 |
| Sólidos | 24 – 27 |
| - Sólidos Solubres (Brix) | 10 – 16 |
| - Fibra (seca) | 11 – 16 |
| <u>En el jugo</u> | |
| Azúcares | |
| - Sacarosa | 75 – 92 |
| - Glucosa | 70 – 88 |
| - Fructosa | 2 – 4 |
| Sales | |
| - Inorgánicos | 3.0 – 3.4 |
| - Orgánicos | 1.5 - 4.5 |
| Ácidos Orgánicos | 1- 3 |
| Aminoácidos | 1.5 - 5.5 |
| Otros No Azúcares | |
| - Proteínas | 0.5 – 0.6 |
| - Almidones | 0.001 – 0.050 |
| - Gomas | 0.3 – 0.6 |
| - Ceras, Grasas, etc | 0.15 – 0.50 |
| - Compuestos Fenólicos | 0.10 – 0.80 |

Fuente: Larrahondo, J.

2.3 PROCESO DE ELABORACIÓN DE AZÚCAR

2.3.1 Recepción y Preparación de la caña

Al ingresar al ingenio la caña es pesada en la balanza de plataforma Mettler Toledo de 70 toneladas de capacidad, que posee ocho sensores luego se transporta empleando grúas a las mesas alimentadoras, para luego ser conducidos al primer conductor.

De las mesas se descarga a un conductor N° 02 donde recibe el primer lavado, empleando agua mediante caída en cascada, al final hay un Carding Drum, el cual facilita remover la caña, y separa la tierra y paja. Luego pasa al conductor N° 03 donde recibe el segundo lavado y ahí está instalado un nivelador, para acomodar la caña, y luego pase por la batería de machetes.

La caña cortada es descargada al conductor N° 04 donde también se encuentra instalado un nivelador para luego pasar por el tercer juego de machetes realizando un trabajo complementario, con lo cual se consigue una masa homogénea facilitando así su desintegración y la extracción del jugo.

En la parte superior del conductor N° 04 se encuentra un kicker, el cual regula la entrada de la caña cortada no caiga de golpe al desfibrador de martillo tipo Shredder, que se emplea para completar la preparación y la desintegración de la caña y facilitar así la extracción del jugo por los molinos, la caña queda desfibrada en hilos de 2 a 3 pulgadas de longitud. El desfibrador descarga al conductor N° 05, sobre el cual hay un electroimán con el fin de recoger partículas metálicas que eventualmente se encuentran presentes en la caña.

2.3.2 Extracción

La caña preparada entra en el trapiche, realizando la compresión entre las masas de los molinos, obteniendo así jugo y bagazo (residuo final).

Para extraer la mayor cantidad posible de azúcar contenida en el jugo debe recurrirse a un artificio, Imbibición, es por ello que en el quinto

molino se adiciona el agua de imbibición a una temperatura aproximada de 90°C, a su vez los jugos pobres de los molinos sirven de imbibición al molino 4, molino 3 y molino 2, del quinto molino sale el bagazo y es trasladado a los calderos.

En Pucalá el trapiche de la empresa tiene cinco molinos, cada uno está formado por tres mazas, pero algunos han sido modificados y ahora cuentan con cuatro mazas para una mejor eficiencia en la parte de la extracción del jugo.

El jugo es tamizado y luego se pesa en una balanza automática de 6 toneladas de capacidad el cual tiene un cronómetro para contabilizar las pesadas.

2.3.3 Encalado

Después del pesado, se agrega la cal en forma de lechada, iniciando el tratamiento químico y el acondicionamiento de la purificación del jugo crudo.

Se emplea alrededor de 0.790 Kg de cal por tonelada, la cual se disuelve con agua condensada para obtener una concentración de 8 a 10 °Baumé. El tanque de encalado, además de recibir jugo que cae de la balanza también recibe el jugo filtrado proveniente de los filtros rotatorios al vacío y después del tiempo de retención necesario se pasa el jugo encalado por unos calentadores para elevar la temperatura ligeramente por encima del punto de ebullición (102 — 105 ° C), el calor es una agente físico, con la cal que es un agente químico, sirve principalmente para acelerar la limpieza del jugo mezclado.

2.3.4 Clarificación de los jugos

El jugo calentado pasa a través de un tanque flash, para eliminar gases e incondensables y disminuir la velocidad del jugo, con la que llega de los calentadores, antes de ingresar a los clarificadores se le agrega el floculante para ayudar la formación rápida de flóculos, los cuales precipitan hacia el fondo del clarificador, y por la parte superior sale el jugo limpio con un pH de 7 – 7.2, que pasa por el tamiz para luego ser

bombeados a los evaporadores; mediante las bombas de diafragma se succiona la cachaza y es almacenada en un equipo llamado MINKLER; donde se mezcla con el bagacillo para formar una masa más compacta, facilite la filtración y obtener la torta.

2.3.5 Evaporación

En la empresa consta con 11 evaporadores en serie, teniendo tres cuerpos para el primer efecto (pre evaporador): El Pre Squier, el Pre BMA y el Pre Francés. Luego están secundados por dos baterías de evaporadores de cuádruple efecto, una batería es de marca Fletcher y la otra es la batería de marca de Babcock & Wilcox (Batería Francés), con cuatro evaporadores cada una.

El vapor utilizado proviene de los turbogeneradores y de las turbinas de los molinos a 30 Psig que ingresa al Pre evaporador y el vapor vegetal que sale del pre evaporador a 15 Psig ingresa al primer efecto, y su vapor de salida sirve como elemento calefactor para el segundo efecto, el vapor de salida de éste sirve como elemento calefactor para el tercer efecto y así hasta el cuarto efecto, de igual manera en forma de serie se va concentrando desde el primer efecto hasta el cuarto efecto obteniéndose un jarabe de 60 a 65 Brix, que es bombeado a la sección de los vacumpanes para su cocimiento y cristalización del azúcar. **Ver FIGURA 2.3**

2.3.6 Cocimiento y Cristalización

En el ingenio se cuenta con 8 tachos: los tachos N° 1, 2 y 3 son para la preparación de masa cocida tercera, los tachos del N° 4, 5 y 6 son tachos semilleros, el tacho N° 7 es tacho para masa de segunda y el tacho N°8 es para la preparación para masa de primera. **Ver FIGURA 2.4**

La etapa de cocimiento se lleva a cabo mediante un sistema de tres cocimientos. El primer cocimiento se lleva cabo en tachos de primera donde se obtiene masa cocida A, a partir de la cual se obtiene el azúcar de primera o comercial, en los tachos de segunda se produce la masa cocida B y en los de tercera la masa cocida C.

Las masas cocidas son mezclas pastosas formadas por cristales de azúcar y miel. Esta mezcla se forma en los tachos, pero en ellos es imposible obtener el agotamiento total del licor madre de las masas cocidas de baja pureza. Por ello es necesario el uso de cristalizadores. Esta imposibilidad se debe primordialmente a la disminución rápida de la velocidad de cristalización y a las altas viscosidades que se generan a medida que el licor madre se aproxima al estado de agotamiento. **VER CUADRO 2.2**

Por esto después que las masas cocidas se han llevado a la máxima consistencia que se puede trabajar en el tacho, se descarga en el cristizador, en el cual ocurre la cristalización en movimiento hasta que el licor madre llega a ser una mezcla sustancialmente agotada. Muy pocas veces se logra el agotamiento completo. Las masas cocidas finales terminan su elaboración en los cristalizadores. (Díaz, A.; 2002) **Ver FIGURA 2.5**

2.3.7 Centrifugación

La operación de centrifugación consiste en la separación de la miel de los cristales de azúcar formados en la etapa de cocimiento y cristalización. En el ingenio se llevan a cabo tres operaciones de centrifugación independientes; la centrifugación de las masas de primera, la centrifugación de las masas de segunda y la centrifugación de las masas de tercera.

De la centrifugación de la masa primera y segunda obtenemos el azúcar comercia y la miel de primera y de segunda que son almacenados en unos tanques: 5 tanques de miel primera y 4 tanques para miel segunda, que van a ser reciclados al proceso de cocimientos:

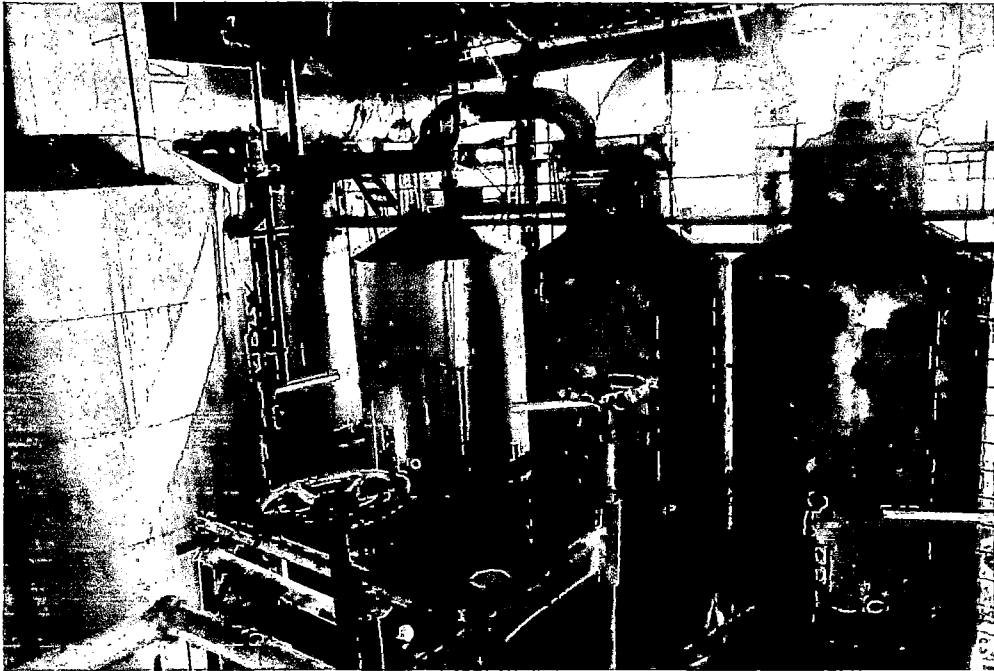
En las centrífugas de tercera se separan el azúcar de tercera de la miel final, después de dicho proceso la miel final se dirige hacia las bombas de miel final y el azúcar de tercera hacia el sinfín de azúcar de tercera donde se agrega agua caliente para formar la magma C, empleada en el área de tachos para elaborar las masas cocidas de segunda y primera. La miel final o melaza es previamente pesada en una balanza para luego ser

enviada a los tanques de almacenamiento, para su posterior comercialización.

2.3.8 Envasado

El azúcar A y B se mezclan por medio de un espiral sin fin que la transporta a un elevador y de allí a las tolvas de envases; Pucalá envasa en bolsas de papel, para una mejor conservación, de 50 kg. Para conservar mejor el azúcar es necesario reducir la humedad que contiene, también no debe estar muy caliente, si está a una temperatura mayor de 38° se endurecerá.

FIGURA N° 2.3.- Evaporadores de múltiple efecto



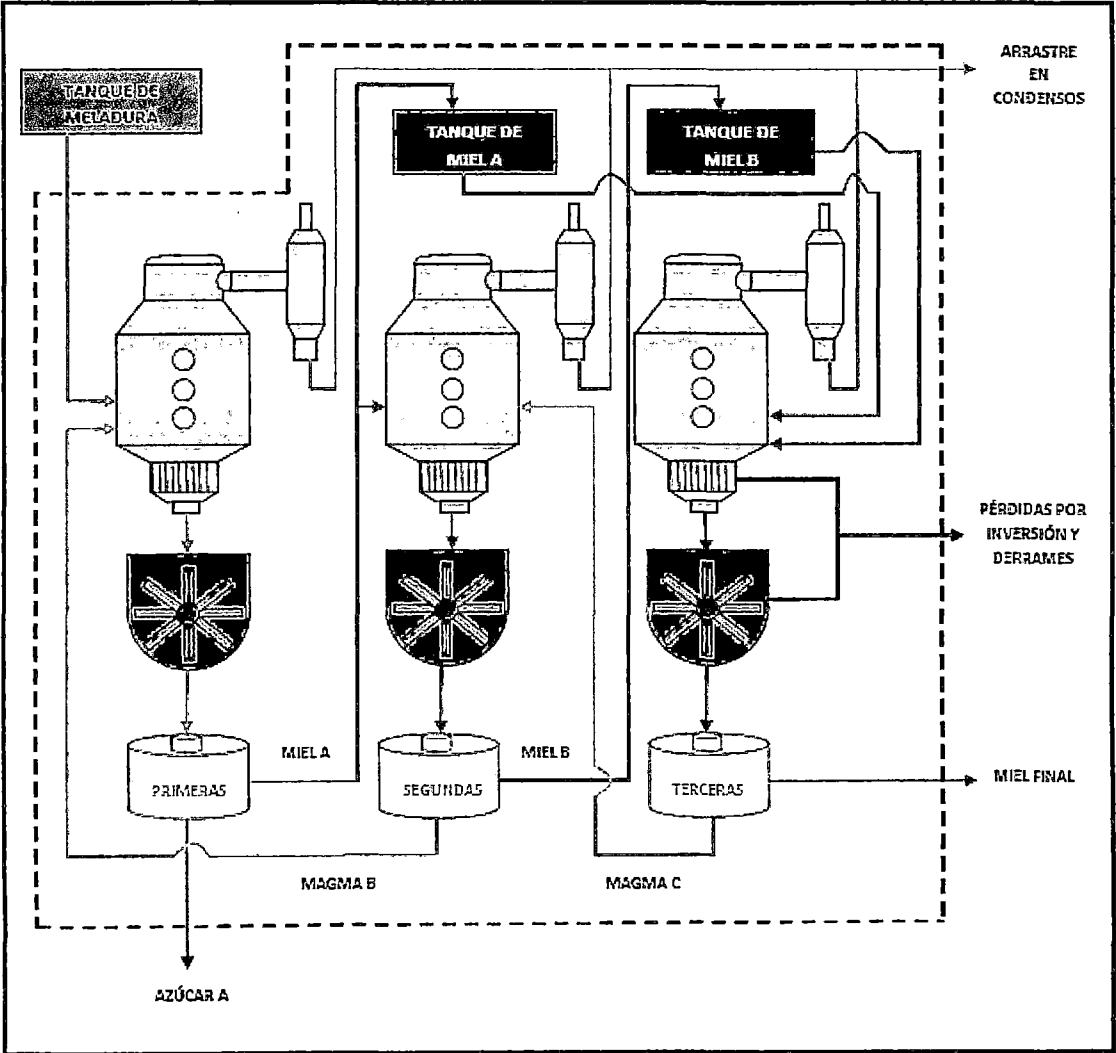
Fuente: AGROPUCALA S.A.A

FIGURA N° 2.4.- Vacumpanes



Fuente: AGROPUCALA S.A.A

FIGURA N° 2.5.- Sistema de cocimiento de tres templas



Fuente: Zepeda, E. (2012)

CUADRO N° 2.2.- Composición de las masas cocidas y mieles

| | | |
|---------------|-----------------------|-----------|
| | Cantidad de Solidos | 94.1 |
| | Volumen | 69.1 |
| Masa Cocida A | Pureza | 84.9 |
| | Contenido del Cristal | 56.1 |
| | Agotamiento | 66 |
| | Cantidad de Solidos | 50.4 |
| Masa Cocida B | Volumen | 36.6 |
| | Pureza | 72.7 |
| | Contenido del Cristal | 46.7 |
| | Cantidad de Solidos | 37.6 |
| Masa Cocida C | Volumen | 27 |
| | Pureza | 55 |
| | Contenido del Cristal | 30.8 |
| Miel A | Brix | 81 - 84 |
| | Pureza | 64 - 67 |
| Miel B | Brix | 86 - 89 |
| | Pureza | 49 - 51 |
| Miel C | Brix | 88 - 90 |
| | Pureza | mínima 35 |

Fuente: Rein P. (2007)

CUADRO N° 2.3.- Parámetros de operación de evaporadores

| | |
|----------------------------------|--------------------------------|
| Presión de Vapor | 8 - 15 Psig |
| Vacío | 27 - 27 Pulgadas de Hg. |
| Brix de Meladura | 60 - 70 |
| Nivel de Jugo | 1/ 3 altura de los tubos |
| Caída Total de Presión | 22 a 23 Psia |
| Diferencial de Presiones | 5.5 a 6.0 Psia/ Cuerpo |
| Diferencial de Temperatura | 44.4 - 50 °C |
| Temperatura de Agua de Inyección | 21 - 27 °C |
| Diferencial Terminal Condensador | 5.6 °C o menos |
| Gases Incondensables | Calandrias libre de gases |
| Agua Condensada | Calandria libre de condensados |
| Temperatura de Agua de Cola | 35 a 46 °C |

Fuente: Hacienda Azúcar

CUADRO N° 2.4.- Parámetros de operación de tachos

| | Pureza | Intermedia entre la meladura y la semilla. |
|----------------------|-------------------------------|--|
| Masa Cocida A | Densidad | Mínima 92.5 °Brix |
| | Caída de pureza masa a miel | Mínima 15.0 puntos |
| | Tiempo de cocción | Mínimo 2.0 horas |
| | Pureza | Adecuada a la Pureza de Miel B |
| Masa Cocida B | Densidad | Mínima 94 °Brix |
| | Caída de pureza masa a miel | Mínima 17.0 puntos |
| | Tiempo de cocción | Mínimo 3.0 horas |
| | Tiempo de cocción | Mínimo 5.0 horas |
| Masa Cocida C | Concentración final | Mínima 95.5 °Brix |
| | Pureza de la masa cocida "C". | Máximo 62 % |
| | Pureza de la semilla | Mínima 85 % |
| | Caída de pureza masa a miel | Mínima 20 puntos |

Fuente: Rein P. (2007)

2.4 PROCESO DE CRISTALIZACIÓN DE MASA COCIDA C

La cristalización por enfriamiento de soluciones saturadas continúa siendo el método predominante y el de más extenso uso. Las soluciones sobresaturadas empleadas para la cristalización pueden proceder de la disolución de materias brutas o de evaporación de soluciones diluidas.

Una de las partes más importantes del proceso de producción de azúcar en la industria azucarera es el proceso de cristalización, fase tecnológica decisiva de la extracción de la sacarosa disuelta en el jarabe.

La cristalización es un proceso simultáneo de transferencia de masa y calor, donde la formación y crecimiento de los cristales está asociado a cierto grado de inestabilidad en el medio, para conseguir que las moléculas del soluto, se difundan a través del seno de la misma y se depositen sobre los cristales ya presentes o formen nuevos cristales. (Díaz, T.; Domínguez, F.; 2003)

En la etapa de cristalización un operador supervisa el proceso, decidiendo la forma de operar en base a la observación visual de la fase en la que se encuentra el proceso de cristalización.

En los tachos la cristalización ocurre porque la sobresaturación es mantenida por evaporación del agua del licor madre, a diferencia que en el cristalizador la sobresaturación del licor madre se mantiene por enfriamiento, para lograr el agotamiento. (Contreras, L.; Hernández, R.; 2004)

El rendimiento de azúcar es determinado de forma significativa por la pureza de la melaza alcanzada. Esta pureza depende ante todo de la calidad de la cristalización, particularmente durante la última etapa, y de las condiciones de saturación. (Díaz, A.; 2002)

2.4.1 Objetivo de la Cristalización

A. Alcanzar una separación excelente del azúcar de los no-azúcares, para ello se precisa de un proceso bien controlado.

B. Realizar el agotamiento de la masa de "C", lo óptimo es obtener una caída de pureza de 20 a 22 unidades.

C. Obtener una melaza con menor pureza, para así garantizar menores pérdidas de sacarosa, logrando un mayor rendimiento de azúcar.

2.4.2 Mecanismo de cristalización

Cualquier operación de cristalización debe de reunir los siguientes tres pasos básicos:

A. Sobresaturación.

El estado de sobresaturación es un rango característico de todas las operaciones de cristalización. La sobresaturación de un sistema puede ser logrado por enfriamiento, evaporación, la adición de una gente precipitante o un agente diluyente o como resultado de la reacción química entre dos fases homogéneas, siendo la práctica más común para lograr una sobresaturación someter una solución diluida a una evaporación.

B. Formación de núcleos cristalinos.

La nucleación es la formación espontanea o inducida de los primeros cristales de soluto o puede definirse como la generación espontánea o inducida dentro de una fase metaestable de una fase más estable en la cual un cristal es capaz de crecer.

La nucleación puede ocurrir espontáneamente o puede ser inducida artificialmente refiriéndose respectivamente a una nucleación homogénea y heterogénea.

Exactamente como se forma un núcleo de un cristal dentro de un sistema líquido no es conocido con certeza. Probablemente el mecanismo de nucleación es como sigue: pequeñas estructuras son formadas, primero por la colisión de dos moléculas, luego el choque de otra con el par formado y así sucesivamente hasta formar pequeños núcleos, estos núcleos pueden existir momentáneamente porque, además de las fuerzas atractivas y repulsivas entre las

moléculas, existe otra fuerza destructiva de las moléculas del solvente sobre los núcleos formados. El proceso de construcción, el cual ocurre muy rápidamente solamente puede continuar en regiones locales de muy alta concentración, muchos de estos núcleos se re disuelven debido a su extrema inestabilidad, sin embargo, cuando estos núcleos alcanza un tamaño crítico pasan a ser estables y el proceso de desarrollo de cristal continua alrededor de ellos.

La nucleación espontanea ocurre cuando durante el enfriamiento de una solución el sistema alcanza la región lábil.

C. Crecimiento del cristal.

Tan pronto como un núcleo estable, o sea partículas más grandes que el tamaño crítico han sido formados en un sistema sobresaturado, empiezan a crecer en la forma de cristales de tamaño visible.

Básicamente el crecimiento del cristal consiste de dos pasos: Difusión de los iones o moléculas a la superficie del cristal en crecimiento y la deposición de estos iones sobre la superficie.

Las moléculas o iones del soluto llegan a las caras en desarrollo del cristal por difusión a través de la fase líquida. Cuando llegan a la superficie las moléculas o iones deben ser aceptadas por el cristal y organizados dentro del enrejado.

2.4.3 Fases del proceso de cristalización

Durante el proceso de cristalización se atraviesa una multitud de diferentes estados de proceso.

A. Semillación para un pie de templa de masa cocida C

- i. En un molino de bolas se agrega 5kg de azúcar blanca refinada, con 8L de alcohol y se muele aproximadamente por 12 horas, para obtener la jalea.

- ii. Se alimenta al tacho con un 50% de jarabe para concentrarlo, después de unos 30 min aproximadamente se le agrega la jalea.

Ver FIGURA N° 2.6

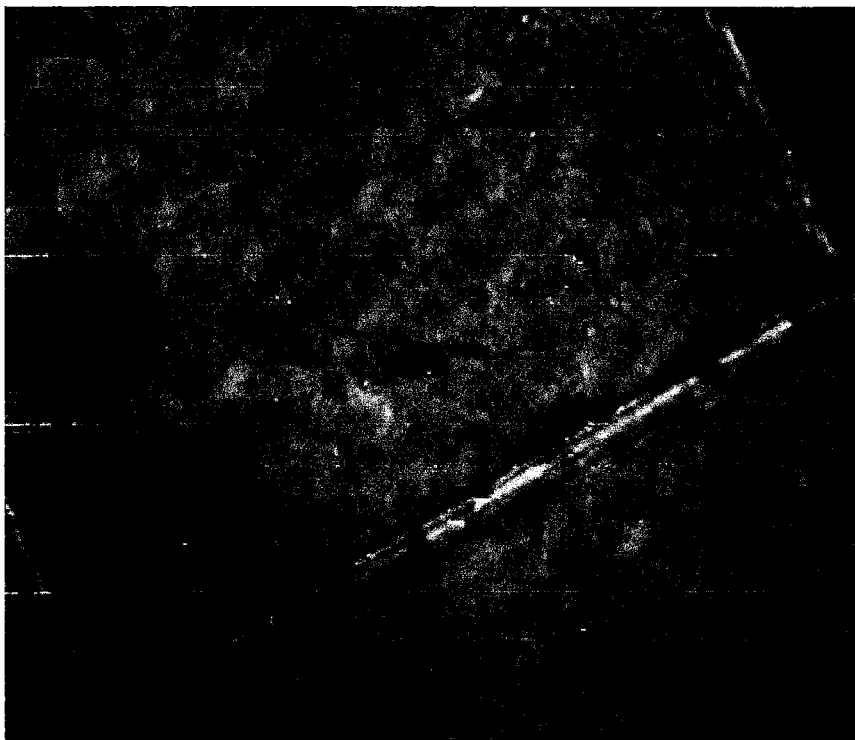
- iii. La jalea se va alimentando lo que origina que el grano crezca hasta obtener un tamaño de 0.2 a 0.4 mm. Esta semillación es para 4 pies de templeas de "C" dura de 3 a 4 hr. Habiendo un buen vapor, a una temperatura de 60 – 70 °C y un vacío de 25 lb. /plg2. **Ver FIGURA N° 2.7**

- iv. Se sigue jalando jarabe hasta obtener el 100% del tacho con semilla de templea de "C", denominado grano formado.

B. Elaboración de templea de masa cocida C

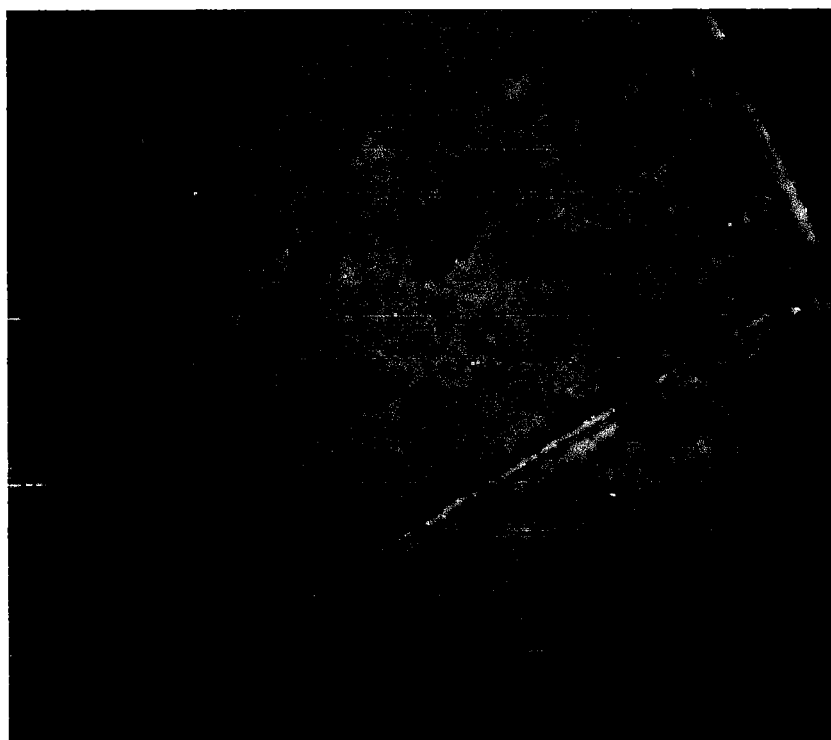
- i. Terminada la semillación se hace un corte de un pie de dos templeas de semilla de "C" al granero de semilla de "C".
- ii. El tacho se queda con un pie de dos templeas de semilla de "C".
- iii. Se manda un pase de un pie de una templea de semilla de "C" a otro tacho.
- iv. Se quedan los dos tachos con un pie de templea de semilla de "C", del 50%.
- v. Para que se forme la templea de "C", se necesita un pie de templea de semilla de "C", del 50% y se sigue jalando jarabe hasta obtener al 100%, se vuelve hacer un corte y el 50% pasa a otro tacho.
- vi. El 50% que queda en el tacho es alimentado con miel "B" durante el crecimiento del grano habiendo un buen vapor y un vacío de 25 lb. /plg2 hasta obtener el 100% de la capacidad del tacho. La templea de "C" tarda para formarse de 4 a 5 hr. **Ver FIGURA N° 2.8**

FIGURA N° 2.6.- Etapa para realizar la siembra



Fuente: Tadeo, F.; Álvarez, T; González S.

FIGURA N° 2.7.- Cristales pequeños de azúcar



Fuente: Tadeo, F.; Álvarez, T.; González S.

FIGURA N° 2.8.- Sobresaturación y Cristalización



Fuente: Tadeo, F.; Álvarez, T.; González S.

C. Cristalización por enfriamiento

Las masas cocidas de tercera o MCC, debido al menor grado de pureza y mayor viscosidad, la cristalización de las mismas se lleva cabo empleando un sistema compuesto por varios cristalizadores abiertos en forma de U, que tienen agitadores moviéndose a baja velocidad.

En el ingenio existen 15 cristalizadores tipo Blanchard (de aspas giratorias con enfriamiento interno), además se trabaja en dos series de cristalizadores:

- i. La masa cocida C preparada en los tachos de tercera es descargada a los cristalizadores de MCC N° 09 o N° 10
- ii. La masa cocida C del cristizador de MCC N°09 comienzan a fluir por los cristalizadores intermedios hasta llegar al cristizador de MCC N° 1, esta batería de cristalizadores es la serie A.
- iii. La masa cocida C del cristizador de MCC N°10 comienzan a fluir por los cristalizadores intermedios hasta llegar al cristizador de MCC N° 15, esta batería de cristalizadores es la serie B.
- iv. El tiempo de residencia de la masa cocida C en los cristalizadores es aproximadamente 16 horas.
- v. Luego pasa por el re-calentador de masa cocida C es depositado en el mezclador que lo alimenta a la centrífuga de tercera, Fives Cail.

Los valores promedio de los parámetros de operación de la etapa de cristalización de MCC se muestran en el **CUADRO 2.6**

CUADRO N° 2.5.- Valores promedios de las variables fisicoquímicas de masa cocida C

| Templa de Masa Cocida C | |
|-------------------------------|---------------------|
| Brix | 98 - 99 % mínimo |
| Pureza | 58 – 60 % promedio |
| Rendimiento de cristal (%) | 36 – 40 % promedio |
| Agotamiento | 20 – 24 % promedio |
| Pureza Magma “C” | 85 – 88% |
| Pureza miel final | 35 – 39.5 % máximo |
| Temperatura Masa de “C” | |
| Salida de los cristalizadores | 40 – 45 °C promedio |

Fuente: Dominguez, G. (2013)

CUADRO N° 2.6.- Valores promedios de los parámetros de operación en el control de masa cocida C

| CORRIENTE DE PROCESO | PARÁMETROS DE OPERACIÓN | VALOR NORMAL DE OPERACIÓN | | PARÁMETROS DE OPERACIÓN | VALOR NORMAL DE OPERACIÓN HORAS |
|----------------------|--|---------------------------|-------------|-------------------------|---------------------------------|
| | | °F | °C | | |
| MASA COCIDA C (MCC) | Temperatura MCC a la salida de los cristalizadores | 120 -125 | 48.8 - 51.6 | | |
| | Temperatura MCC en el mezclador de centrifugas | 131 -134 | 55.0 - 56.7 | TIEMPO DE DESCARGA | 24 - 48 |
| | Temperatura del agua de calentamiento de la MCC | 149 | 65 | | |

Fuente: Zepeda, E. (2012)

2.4.4 Subproducto

La melaza o miel final es el producto final del proceso de fabricación del azúcar, un jarabe denso de color oscuro, obtenido de las centrífugas al separar los cristales de azúcar de la masa cocida final. **(Ramírez, N.; 2000).**

De la melaza no se puede extraerse más sacarosa por los métodos físicos convencionales y tampoco sería económico.

La composición química de la melaza es muy heterogénea y en extremo variable, pues ésta depende de factores agrícolas e industriales tales como la variedad de la planta, el grado o estado de su madurez, el clima, el suelo, condiciones y período de cultivo, tipo de corte y de la eficiencia industrial del proceso de extracción de azúcar en el tándem de molinos y en general de las demás operaciones de fábrica.

Esta variación puede repercutir en el contenido nutritivo, el sabor, el color, la viscosidad y el contenido total de azúcar. **(Aguilar, N.; 2010)**

Por otro lado, la melaza de caña se caracteriza por tener una composición en grados Brix 68 - 85 % aproximadamente y un pH entre 5.0 y 6.1. **(Fajardo, E.; Sarmiento, S.; 2007).**

La composición química promedio de la melaza se muestra en el **CUADRO 2.7.**

Debido a su alto contenido de azúcares, la melaza de caña tiene un considerable precio en el mercado internacional; actualmente, constituye un producto importante de la industria azucarera por su empleo como material o sustrato, al ser un coproducto de bajo costo capaz de ser modificado por la acción de los elementos vivos para la transformación en procesos biotecnológicos en productos o derivados finales útiles al hombre. **(Aguilar, N.; 2010)**

La melaza es generalmente empleada para la alimentación animal y para la producción de lácteos o también como suplemento alimenticio para el hombre. **(Fajardo, E.; Sarmiento, S.; 2007).**

Algunas de las principales aplicaciones para el aprovechamiento de la melaza de caña de azúcar se muestran en el **CUADRO 2.8.**

CUADRO N° 2.7.- Composición química de la melaza de caña de azúcar

| Componente | Composición (%) |
|--|-----------------|
| Agua | 20 |
| Sacarosa | 35 |
| Glucosa | 7 |
| Otros Carbohidratos | 4.1 |
| Cenizas | 12 |
| Compuesto Nitrogenados | 4.5 |
| Compuestos no nitrogenados | 5 |
| Ceras, esteroides y esterofosfolípidos | 0.4 |

Fuente: Zepeda, E. (2012)

CUADRO N° 2.8.- Aprovechamiento de la melaza de caña de azúcar

| Utilización | Generalidades |
|--|--|
| Alimentos | Alimentación rica |
| Animales | Alimentación menos rica: desecados sobre pulpas, mezcla con diversos alimentos, pulverizados de forrajes, suplementos de ensilajes. |
| Recuperación de líquidos desazucarados | Vinazas para la obtención de ácido glutámico. Lejías finales como alimento animal y para la obtención de aminoácidos. Levaduras para la panificación. Grasas de levadura. |
| Fermentación | Alcohol etílico Producción de colaterales de fermentación alcohólica. |

Fuente: Zepeda, E. (2012)

2.4.5 Equipos

A. Vacumpanes

Deben reunir las condiciones para trabajar como un evaporador llevando el jarabe de 60°Brix a la concentración correspondiente a su cristalización (95 a 98°Brix), apropiados para la producción de cristales.

Deben permitir el movimiento de la masa cocida, provocado por las burbujas de vapor producidas durante la ebullición del jarabe que se desprenden en la superficie de calentamiento, agitan y arrastran la masa durante su ascensión a la superficie con un movimiento que debe ser enérgico para lograr una temperatura y sobresaturación uniformes. El calentamiento se realiza con serpentines o haces tubulares; las superficies de calentamiento deben colocarse lo más abajo posible, de tal manera que el jarabe las cubra desde el inicio de la cocción.

Es necesario recordar que de la caída total de la pureza obtenida, los tachos son responsables del 60 a 70%. **Ver FIGURA N° 2.9**

B. Cristalizador de Blanchard

La práctica común de producción de cristales consiste en preparar soluciones calientes casi sobresaturadas y dejarlas enfriar en tanques rectangulares abiertos a temperatura ambiente.

Estos tanques, conocidos como cristalizadores, permiten un área de gran superficie de solución que está en contacto con la atmósfera. La solución caliente concentrada de soluto es vaciada dentro del tanque donde es enfriada por convección natural y evaporación por determinados periodos de tiempo.

El agotamiento de mieles se inicia en los tachos y se concluye en los cristalizadores, los cuales aportan aproximadamente un 30 a 40 % del agotamiento total de las mieles. Es verdad que los cristalizadores no pueden corregir un mal trabajo de los tachos, pero el trabajo eficiente

de los tachos si puede ser arruinado por el trabajo deficiente de los cristalizadores.

La función de los cristalizadores es disminuir la temperatura de la masa cocida "C", que es descargada de los tachos de tercera 1, 2 y 3 en los cristalizadores a una temperatura entre 60-65 °C.

Para el enfriamiento se utiliza un cristizador tipo blanchard (**Ver Anexo A**), para continuar el agotamiento del licor madre, trabaja con agua fría que circula por el interior de los tubos, La masa de "C" baja de temperatura manteniéndose en un rango de 40-46 °C. Es necesario disminuir progresivamente la temperatura de la masa de "C" hasta el punto mínimo en el que sea posible moverla mecánicamente; la viscosidad es el factor limitante. (**Bouzas, N; Estrada, G; Hernandez, M.**).

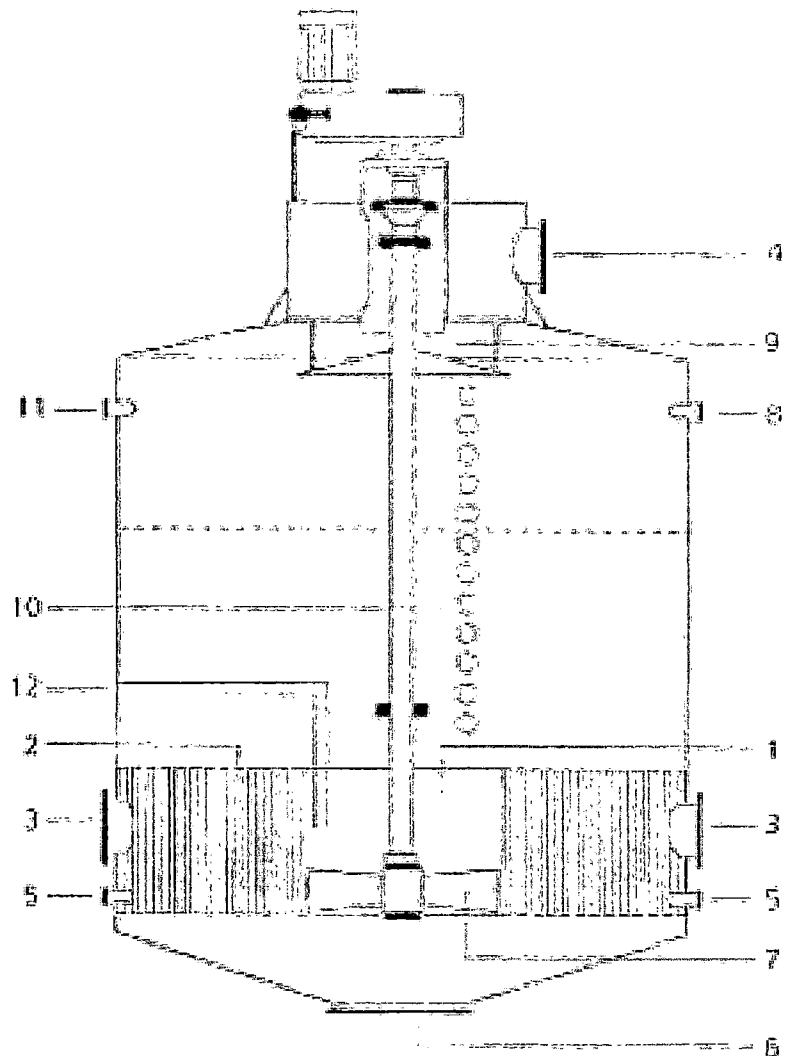
El tiempo consumido en el enfriamiento deberá estar sobre las 23 a 25 horas.

La cristalización continua es una solución tecnológica adecuada a la necesidad de manipular altos volúmenes de masa cocida de forma que el tratamiento para su agotamiento sea uniforme.

Los sistemas continuos emplean cristalizadores independientes unidos en grupos de 4 a 6 unidades, denominadas batería

La comunicación entre los cristalizadores de forma que reciban la masa por un extremo y la entreguen por el otro como se indica en la **FIGURA. 2.10**. La comunicación se llevará a cabo mediante canales alternas en los extremos opuestos de los cristalizadores.

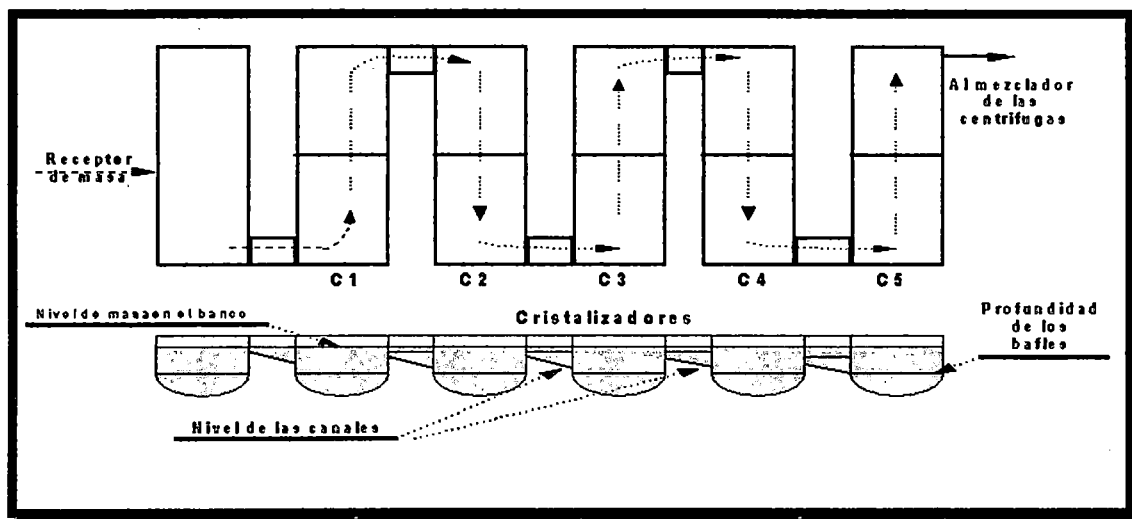
FIGURA N° 2.9.- Diseño de un Vacumpan



1. Tubo Centra; 2. Calandria; 3. Entrada de vapor; 4. Salida de Vapor vegetal; 5. Salida de condensados; 6. Salida de masa cristalizada; 7. Agitador; 8. Bicos spray; 9. Separador de arrastre; 10. Visores; 11. Vent; 12. Entrada de jarabe

Fuente: Honig P. (1953)

FIGURA N° 2.10.- Batería de Cristalizadores



Fuente: Rein P. (2007)

2.4.6 Operación de los cristalizadores

Los cristalizadores para las masas de agotamiento requerirán de un conjunto de instalaciones y operaciones propias de los sistemas de bajas purzas, a fin de obtener los niveles de agotamiento que se requieren en la masa final.

Las bajas purzas y las altas concentraciones de estas masas obligan a elevados tiempos de retención y al empleo de operaciones de lubricación en el tacho, enfriamiento y calentamiento sucesivos antes de la purga para alcanzar realmente caídas de purzas del orden de los 4 a 8 puntos en el cristizador. De ahí la importancia de los procedimientos y de la supervisión de las operaciones de esta área.

No se rebasará el límite de 55°C de temperatura en la masa durante la purga, con independencia del sistema de calentamiento (en el cristizador, calentador de masa, en la centrifuga, etc.) y de las características del ingenio.

Sólo en aquellos casos en que sea posible determinar la verdadera temperatura de saturación, se podrán calentar las masas cocidas a una temperatura superior.

Para la adecuada operación en las instalaciones de los cristalizadores se deben cumplir los requisitos técnicos siguientes:

- Los tiempos máximos de agotamiento en los cristalizadores de agotamiento se estiman entre las 32 y 36 horas para la masa "C".
- Las capacidades requeridas para asumir estos tiempos de retención en el caso de los cristalizadores con enfriamiento a batch serán de 3 500 pies³ (98 m³) por cada 100 000 @ {3 100 pies³ (86 m³) 1 000 ton.} de capacidad de molida del ingenio.
- Las capacidades requeridas para asumir estos tiempos de retención en el caso de los cristalizadores con enfriamiento continuos serán de 3 000 pies³ (85m³) por cada 100 000 @ {2 700 pies³ (75 m³) 1 000 ton.} de capacidad de molida del ingenio.
- Los cristalizadores tendrán habilitado dispositivos para dar movimiento a la masa cocida en su interior y a la vez permitir la circulación de agua de enfriamiento y de calentamiento.
- Será necesario la habilitación de dos sistemas de recirculación para agua fría y caliente en circuitos cerrados, para garantizar que la temperatura mínima de la masa en los cristalizadores sea de 42 °C y la máxima al salir hacia los mezcladores de la centrifuga de 50 a 55 °C. El agua para el calentamiento de las masas no sobrepasará el límite de 70 a 75 °C y preferiblemente este sistema será operado por medio de un control de la temperatura.
- Estarán dotados de válvulas de descarga hermética y fácil de operar.
- Todos los cuerpos dispondrán de válvulas para su adecuada liquidación de todos los residuos durante la liquidación final de la zafra.
- Se dispondrán termómetros indicadores para la temperatura del agua fría y caliente y de la masa cocida.

Para la operación de los cristalizadores de agotamiento síganse las instrucciones siguientes:

- a. Establézcase a partir de la programación del trabajo de los tachos un orden cíclico para recibir las masas de agotamiento.
- b. Llénese hasta que las aspas o hélices que producen el movimiento sobresalgan aproximadamente 6 plg (150 mm), esto es un requisito indispensable para lograr una eficaz transferencia de calor entre la masa y el agua de enfriamiento o calentamiento.
- c. Después de un tiempo inicial de unas 2 a 3 horas de enfriamiento natural, procédase a circular el agua de enfriamiento hasta que la temperatura de la masa descienda hasta 42 °C, si la masa es muy viscosa ajústese el límite mínimo hasta 45°C . El tiempo consumido en el enfriamiento deberá estar sobre las 23 a 25 horas.
- d. Iníciase el proceso de calentamiento como mínimo 8 horas antes de realizar la purga, en concordancia con el ciclo del resto de los cristalizadores. La temperatura de la masa a la salida de los cristalizadores deberá estar en el límite de 52 a 53 °C.

Se han establecido sistemas de control del agotamiento que parten del principio de examinar la pureza del licor madre de cada cristizador para definir el comportamiento de su agotamiento ; a partir del hecho de que por la composición de las masas es posible que los límites de su agotamiento se obtengan antes de las 36 horas y en esos casos se procederá a su purga organizadamente ; si al llegar a las 36 horas se tienen síntomas de una mayor reducción de la pureza del licor madre se decide el alargamiento de su residencia .

CUADRO N° 2.9.- Parámetros de operación en los cristalizadores

PARÁMETROS DE OPERACIÓN EN LOS CRISTALIZADORES

| | | |
|----------------------|------------------------|---------------|
| Masa Cocida A | Temperatura | 54 °C |
| | Tiempo | 2 - 4 Horas |
| | Velocidad de Agitación | 3/4 RPM |
| Masa Cocida B | Temperatura | 54 °C |
| | Tiempo | 6 - 8 Horas |
| | Velocidad de Agitación | 1/2 RPM |
| Masa Cocida C | Temperatura | 65 - 70 °C |
| | Tiempo | 24 - 48 Horas |
| | Velocidad de Agitación | 1/4 RPM |

Fuente: Rein P. (2007)

2.5 AGOTAMIENTO DE MASA COCIDA C

El agotamiento de las mieles en el proceso de producción de azúcar ha sido muy estudiado y actualmente sigue siendo un tema muy debatido debido a su complejidad, pues todo el proceso agro industrial influye en su eficiencia. **(Contreras, L.; Hernández, R.; 2004)**

Dado que las mieles A y B obtenidas luego de la operación de centrifugación se recirculan hacia la fábrica, la sacarosa remanente en éstas mieles puede recuperarse mediante cristalización en la operación de tachos, por lo que las pérdidas de sacarosa en la etapa de cristalización se debe al proceso de agotamiento de la masa cocida de tercera en la serie de cristalizadores continuos.

En los cristalizadores se busca maximizar el agotamiento de las mieles de las masas cocidas, depositándose la sacarosa en los cristales de azúcar obtenidos en los tachos por sobresaturación.

En los cristalizadores de tercera se utiliza agua de enfriamiento para obtener un mejor agotamiento de la miel contenida en la masa, esto para ayudar a aflojar la masa.

El grado al que las mieles finales pueden ser agotadas, depende no solo de una buena práctica de acondicionamiento en el departamento de cristalizadores, sino también del carácter de la masa cocida. **(Zepeda, E.; 2012)**

Para lograr el agotamiento máximo de las soluciones azucaradas (tanto en tacho como en cristalizadores), se hace necesario controlar un grupo grande de factores como: sobresaturación, viscosidad, temperatura, velocidad de agitación, velocidad de enfriamiento, tamaño y contenido de cristales y tiempo de retención, entre otros.

2.5.1 Factores que influyen en el proceso de cristalización

A. Sobresaturación

El proceso de cristalización puede tomar lugar solamente en fases sobresaturadas y la velocidad de cristalización es frecuentemente

determinada por el grado de sobresaturación. **(Aguilar, N.; Román, C.; 2006).**

Una solución está sobresaturada cuando posee una concentración más alta que la que contendría una solución saturada bajo las mismas condiciones de temperatura, esta variación depende de las diferentes zonas de concentración (estable, metaestable y lábil), estas zonas están limitadas por el equilibrio y las líneas de nucleación. **(Domínguez, G.; 2013)**

En la **FIGURA N° 2.11** se observa que el diagrama está dividido en tres zonas:

- Zona estable (subsaturada), donde no es posible la cristalización.
- Zona metaestable (sobresaturada), entre las curvas de sobresaturación y solubilidad, donde la cristalización espontánea es improbable. Sí existe crecimiento de cristales si ya están presentes en la disolución.
- Zona Lábil o inestable, donde es probable la cristalización espontánea.

En los tachos la solubilidad de la sacarosa se reduce evaporando el agua de la solución, mientras que en los cristalizadores la solubilidad se reduce por medio del enfriamiento de la masa cocida.

Es por ello que debe monitorearse continuamente el flujo volumétrico y la temperatura del agua de enfriamiento que se alimenta a los cristalizadores, con el objetivo de mantener un grado de sobresaturación aproximadamente constante, ya que en los tachos la sobresaturación aumenta a medida transcurre el proceso de cocimiento, mientras que en el cristalizador el valor de éste parámetro disminuye a medida se agota la masa cocida, por lo que la única forma de mantener la sobresaturación es por medio del enfriamiento constante. **(Zepeda, E.; 2012)**

La alta sobresaturación conducirá a una alta velocidad de producción de cristales y éstos serán de un tamaño pequeño y no uniforme a la vez que retendrán cantidades considerables de licores madres al separarse de la solución lo que origina que los cristales obtenidos no sean muy puros.

A menudo, los cristales que se originan en condiciones de sobresaturación altas, adoptan formas dendríticas o absorbentes, esta forma permite un crecimiento cristalino rápido ya que los extremos de las dendritas están cerca de lugares relativamente más saturados que el resto de la solución.

Empleando soluciones con bajas sobresaturaciones, resultará una baja velocidad de producción de cristales y éstos serán grandes y uniformes reteniendo una proporción mínima de los licores madre al separarse de la solución, lo que conduce a obtener un producto cristalino relativamente puro.

Cuando la solución sobresaturada alcanza el nivel de saturación la cristalización cesa, a menos que se siga evaporando el solvente la cristalización continuará.

Las condiciones óptimas de un cristalizador son aquellas donde la sobresaturación tiene un valor que garantice una velocidad de cristalización elevada y que no provoque formación del falso grano.

En el **CUADRO 2.10** se muestra los valores de sobresaturación recomendados en la masa cocida C recomendados por algunos autores.

B. Viscosidad

La viscosidad es la variable dominante en los procesos de agotamiento de las mieles en la tecnología de la fabricación de azúcar de caña, y es la que fija los límites dentro de los cuales se puede llevar a cabo el proceso de cristalización. (Díaz, A.; 2002)

El límite hasta el cual la masa cocida puede ser enfriada depende de la capacidad física del cristalizador para manejar el material de alta viscosidad. (Zepeda, E.; 2012)

La experiencia ha demostrado que si la viscosidad es relativamente alta al salir del tachó, por lo general lo es también en los cristalizadores y asimismo al recalentarse hasta aproximadamente la temperatura de saturación antes de purgar las centrifugas. Así, aumentando el contenido de sólidos totales por evaporación intensa en el tachó, la viscosidad y la temperatura de saturación de las mieles finales aumentan. **(Bouzas, J.; Estrada, G.; Hernandez, M.)**

Como ya se explicó, a medida que la viscosidad o la temperatura de saturación de la miel madre de la masa cocida aumentan, la pureza de las mieles finales disminuye. De acuerdo a Chen, las menores purezas de las mieles finales se obtienen a una temperatura de saturación cercana a 55 ° C (131 ° F) y una viscosidad de aproximadamente 1400 -1500 poises. La disminución de la pureza, sin embargo, va siendo menor a medida que la viscosidad se aproxima al máximo que es posible manejar en el equipo, es por ello que es imperativo el mantener un control constante de la viscosidad y de la temperatura a lo largo del proceso de cristalización. **(Zepeda, E.; 2012)**

C. Rendimiento de cristales

La adsorción de sacarosa en los cristales a partir de las mieles madre es directamente proporcional al área superficial de los cristales. Por tanto, a mayor superficie de cristales, mayor será el agotamiento de las mieles madre y para un tiempo dado de acondicionamiento, menor será la pureza de la miel final. **(Zepeda, E.; 2012)**

El rendimiento en cristales es una medida de la eficiencia con que se ha llevado a cabo la operación de cristalización y viene expresado como el porcentaje de cristales presentes en la masa cocida. **(Díaz, T.; Domínguez, F.; 2003)**

Existe un límite máximo de la concentración de cristales en el que la presencia de más cristales disminuye considerablemente la movilidad de la masa cocida hasta que ésta cesa totalmente. Por encima del nivel máximo de concentración de cristales, la movilidad de la masa cocida disminuye rápidamente, excediendo la capacidad mecánica del

cristalizador. Si se corrige añadiendo agua a la masa cocida, la viscosidad de las aguas madre disminuirá y algo de azúcar cristalina disolverá.

Por otro lado, si la concentración de cristales es menor que el óptimo, la caída de pureza en el cristalizador será, para un tiempo de tratamiento dado, menor y las mieles finales tendrán mayor pureza. Por tanto, un pobre o un excesivo contenido de cristales en la masa cocida incrementarán la pureza de la miel final, lo que tenderá a anular el propósito de lograr una concentración de cristales elevada y una masa cocida manejable en el cristalizador. **(Zepeda, E.; 2012)**

Existe diversidad de criterios acerca del contenido de cristales, lo cual puede estar motivado por la estrecha relación que hay entre ésta variable, la viscosidad y la velocidad de cristalización; con los valores de viscosidad que se tienen hoy en la actualidad, no es recomendable trabajar a contenidos de cristales superiores a 40 %, por lo que en éstos casos debe realizarse una adecuada lubricación de las plantas usando mieles saturadas. **(Díaz, T.; Domínguez, F.; 2003)**

En el **CUADRO 2.11** se muestra el límite máximo del contenido de cristales en la masa cocida C.

D. Tamaño del cristal

El tamaño del cristal es importante puesto que influye sobre la rapidez y el grado de agotamiento de las mieles, la eficiencia de las centrifugas y la tendencia de las masas cocidas a formar grano espontáneo (grano falso) durante el enfriamiento.

Tanto los cristales grandes como los pequeños tienen ventajas y desventajas. El tamaño óptimo de cristales en una masa cocida final es en el mejor de los casos una avenencia entre influencias opuestas. Dicho tamaño óptimo depende en grado considerable de la viscosidad de las aguas madres cuando son purgadas y la capacidad de las centrifugas para efectuar una buena separación de cristales y melazas. **(Bouzas, N; Estrada, G; Hernandes, M.)**

Un mayor agotamiento de mieles puede obtenerse reduciendo dentro de los límites permisibles el tamaño del grano para aumentar la superficie cristalina de la masa cocida, puesto que la mayor sobresaturación resultante tiende a agotar de manera más completa la miel madre.

Al disminuir lo más posible el tamaño del cristal se aumenta la superficie disponible para que la sacarosa pueda depositarse fomentando el agotamiento de la miel. El área total de cristales de una masa cocida final de baja pureza, con respecto a su contenido de miel, es una de las propiedades que determinan el índice total de cristalización y la caída de pureza en el cristalizador. (Zepeda, E.; 2012)

En el **CUADRO 2.12** se muestran los rangos de tamaño de grano en masas cocidas recomendados por algunos autores:

E. Uniformidad de los cristales

Manteniendo un control adecuado de las templeas en los cristalizadores es posible obtener de manera consistente cristales de uniformidad suficiente, lo que permite obtener azúcar de bajo grado y de mayor pureza. El grano uniforme también puede dar como resultado masas cocidas de mayor densidad, lo que debe dar lugar a una mejor recuperación. (Zepeda, E.; 2012)

El agotamiento de las templeas donde existan cristales pequeños, conglomerados y gemelos, se dificulta por la afectación tanto a la movilidad de la masa en los cristalizadores que causan los mismos, como también a la eficiencia de la posterior centrifugación, con el consecuente decremento de la calidad del azúcar por el efecto de la retención de miel en la capa de azúcar. Hay que agregar además que una gran cantidad de los cristales salen con la miel durante la purga.

F. Pureza de masa cocida C

El efecto que la pureza tiene sobre la cristalización es de tal importancia que repercute en la calidad del producto terminado, es decir, si la alimentación al tachó se hace con una meladura de pureza baja afecta al proceso debido a que el tiempo de residencia se incrementa pues será necesario elevar esta pureza con evaporación dentro del cristalizador y esto afectará el costo de producción del producto terminado. **(Domínguez, G.; 2013)**

La teoría y la práctica coinciden en aceptar que las templeas con purezas de 58 a 60 producen mieles finales más agotadas según **Hugot (1974)**.

G. Impurezas

La presencia de impurezas puede tener un efecto profundo en la velocidad de crecimiento de los cristales. Las impurezas disminuyen la velocidad de cristalización a través de dos mecanismos:

- Disminuyendo la velocidad de transferencia de masa a través del aumento de viscosidades de la solución y consecuente disminución del coeficiente de difusión.
- Disminuyendo la velocidad de reacción superficial a través de la absorción en fases específicas del cristal

Las impurezas provocan grandes modificaciones en la forma de los cristales debido a la alteración de las velocidades relativas de crecimiento de las diferentes fases del cristal.

En presencia de una masa cocida final que ha sido producto del procesamiento de jugos con altos contenidos de impurezas, estas se caracterizan por la presencia de cristales deformados y niveles de viscosidad superiores a los normales.

Los cristales deformados son característicos de altos contenidos de impurezas en la red cristalina, lo que impide una deposición uniforme de la sacarosa en las caras del cristal.

Lo anterior demuestra que en presencia de jugos con altos contenidos de impurezas la posibilidad de agotamiento en el cristalizador es muy limitada, y todos los sistemas de trabajo para los tachos, cuya eficiencia se basa en un agotamiento normal en los cristalizadores, se ven imposibilitados de obtener buenos resultados en el agotamiento del licor madre.

H. Temperatura enfriamiento

Esta es uno de los principales factores que influyen en el proceso de cristalización por enfriamiento, dado que el propósito del enfriamiento es continuar la cristalización de la sacarosa después de que la cristalización isotérmica ha sido llevada hasta el límite viable en el tacho, la masa se descarga en los cristalizadores a una temperatura de 65 a 70 °C y una sobresaturación aproximada de 1,2. A esta temperatura el licor madre de la masa cocida no se puede agotar de sacarosa cristalizable, por lo tanto, para que la cristalización continúe hasta el límite final de agotamiento es necesario disminuir progresivamente la temperatura a la masa cocida, hasta llegar a la temperatura mínima a la cual puede ser trabajada mecánicamente para ser agotada, siendo aquí la viscosidad el factor limitante. (Díaz, A.; 2002)

A esta temperatura mínima a la cual el enfriamiento de la masa cocida no puede seguir llevándose a cabo en el cristalizador por efecto de la viscosidad de la masa cocida, se le conoce como temperatura mínima de enfriamiento y establece el límite de temperatura a la cual la masa cocida puede ser enfriada y agotada.

En todo momento debe permitirse que la cristalización continúe hasta alcanzar la temperatura mínima de enfriamiento. (Zepeda, E.; 2012)

Para las masas cocidas de alto Brix (95-97), la temperatura puede estar entre 40 y 47 °C, pero para las masas cocidas de menor concentración (92-93) Brix, puede llegar hasta 35 °C. (Díaz, A.; 2002) En el **CUADRO 2.13** se muestran los valores de temperatura mínima de enfriamiento recomendados por algunos autores.

I. Tiempo de residencia en los cristalizadores

El objetivo de la masa cocida en el cristalizador es acercarse tanto como sea posible al estado de agotamiento aceptable para la miel en un mínimo de tiempo.

El tiempo que dure la cristalización en un cristalizador depende generalmente del grado de sobresaturación ya que una alta sobresaturación puede conducir a una rápida cristalización aunque la solución sea enfriada muy lentamente.

En los cristalizadores de tercera, la velocidad de cristalización es tan baja que lo que se pretende es enfriar las masas de tercera en una forma tan lenta como sea posible para así incrementar el agotamiento. Debe buscarse que el tiempo de residencia de la masa en los cristalizadores sea el más alto posible para promover el mayor agotamiento de la masa cocida. Como esto generalmente es impráctico dado que el ingenio trabaja a altas razones de molido, lo más conveniente es acelerar el proceso de cristalización por medio del incremento de la tasa de enfriamiento y de la velocidad de rotación de los elementos mecánicos de agitación en los cristalizadores cuando esto es factible. (Zepeda, E.; 2012)

J. Velocidad de enfriamiento

La relación entre el tiempo de residencia dedicado al enfriamiento y la variación de temperatura en el proceso, definen la velocidad de enfriamiento reportándose en la literatura clásica que la velocidad óptima de enfriamiento es aquella en la que se logra mantener la

sobresaturación lo más alta posible, sin formarse falso grano. **(Zepeda, E.; 2012).**

La velocidad de enfriamiento depende de las características de las masas cocidas, la naturaleza de las impurezas y el diseño y la fuerza del cristizador. Es importante que el enfriamiento no sea rápido, pues puede ocasionar la reproducción en las masas cocidas. La velocidad puede ser aproximadamente de 1,7 °C/h. **(Díaz, T.; Domínguez, F.; 2003)**

El **CUADRO 2.14** muestra la velocidad de enfriamiento en cristizadores recomendada por ciertos autores.

K. Temperatura de Calentamiento

Otro aspecto importante que debe controlarse una vez finalizado el proceso de cristalización, es el recalentamiento de la masa cocida hasta la temperatura de saturación de la miel madre con el objetivo de disminuir su viscosidad y facilitar su centrifugación, ya que un pobre calentamiento de la masa puede hacer difícil su manejo y la separación de la miel en las centrífugas, mientras que un calentamiento excesivo de la misma podría provocar una redisolución de los cristales de azúcar formados, resultando en un incremento de la pureza en miel final y anulación del trabajo realizado en los cristizadores.

Normalmente, la temperatura de saturación a la cual debe ser calentada la masa cocida ronda alrededor de 125 °F (51.7 °C), pero con masas cocidas de alta densidad la temperatura de saturación se incrementa hasta aproximadamente 131 °F (55 °C), que es la temperatura más alta permisible para que no se produzca un alza de pureza en la miel final. **(Zepeda, E.; 2012)**

El **CUADRO 2.15** muestra los valores de temperatura de calentamiento en cristizadores recomendada por ciertos autores.

L. Velocidad de agitación

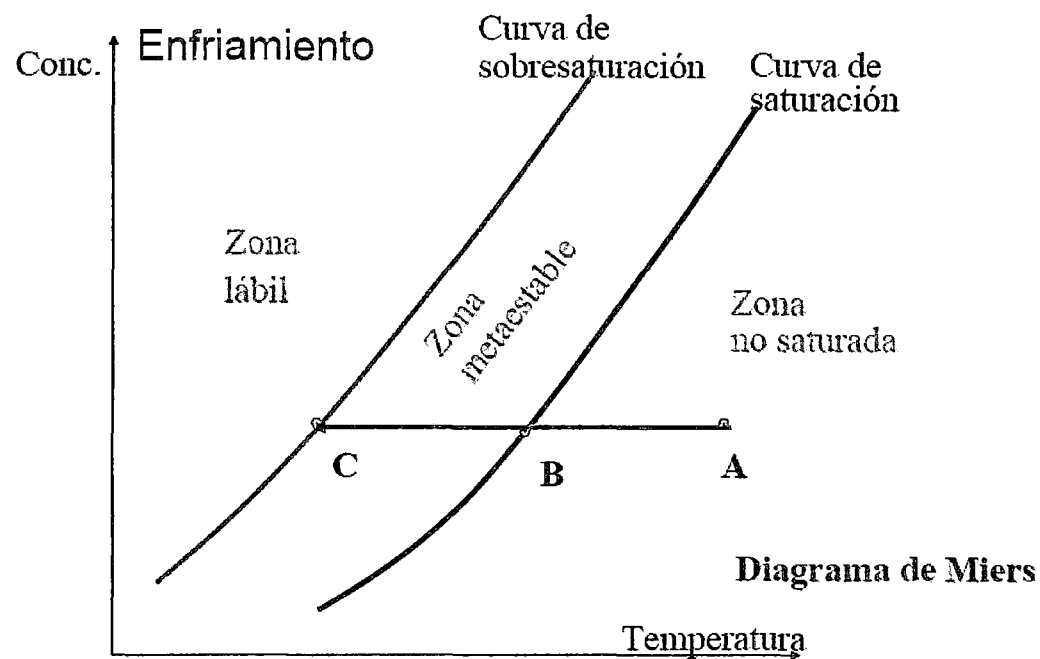
Para investigar la influencia de la velocidad de agitación sobre la cinética de cristalización en los cristalizadores por enfriamiento de tercera. Se observa que con velocidades superiores a las que actualmente se utilizan en la mayoría de las empresas, se obtienen resultados más favorables, y que el incremento de la misma repercute de forma exponencial en la pureza de la miel final obtenida.

Un aumento favorece la velocidad de cristalización pero a su vez tiende a disolver los cristales pequeños, lo cual puede resultar perjudicial, si no ocurre una recristalización de ésta sacarosa. (Díaz, T.; Domínguez, F.; 2003)

El CUADRO 2.16 muestra los valores de velocidad de agitación en los cristalizadores recomendada por ciertos autores.

De la misma se puede concluir que la mayoría de los autores recomiendan velocidades de agitación inferiores a 1 rpm.

FIGURA N° 2.11.- Sobresaturación y Cristalización



Fuente: Rein P. (2007)

CUADRO N° 2.10.- Valores de sobresaturación recomendado en la masa cocida C

| Valores de Sobresaturación recomendados | Autor |
|--|---------------------------|
| Mayor de 1.5 | Mc Ginnis, Moore y Ulston |
| Menor de 1.44 | Hugot |
| 1.1 a 1.2 | Jenkins |
| 1.1 a 1.2 | Irimía |
| 1.1 a 1.2 | West |
| 1.1 a 1.2 | Awad |
| 1.08 a 1.20 | Carrazana |
| 1.25 a 1.60 | Maurandi V y Montovani G |

Fuente: Díaz, T., Domínguez, F. (2004)

CUADRO N° 2.11.- Límite máximo del contenido de cristales en la masa cocida C

| Contenido de cristales recomendados (%) | Autor |
|---|-------------|
| Límite Superior 45 | Alkins |
| 44 | Guillet |
| Límite Superior 45 | West |
| 35 – 40 | Honig |
| 40 | Díaz |
| 43 | Carrazana |
| 50 | Pérez y col |

Fuente: Díaz, T., Domínguez, F. (2004)

CUADRO N° 2.12.- Tamaño en milímetros recomendados para los cristales de masa cocida C

| Tamaño de cristales recomendados | Autor |
|----------------------------------|----------------|
| 0.20 – 0.35 | Jenkins |
| 0.35 | Pedrosas |
| 0.25 – 0.35 | Honig |
| 0.30 | Díaz |
| 0.45 – 0.50 | Maurandi y col |

Fuente: Díaz, T.; Domínguez, F. (2004)

CUADRO N° 2.13.- Valores de temperatura mínima de enfriamiento recomendada en los cristalizadores

| Valores de temperaturas de enfriamiento recomendados (°C) | Autores |
|--|-------------------|
| 41- 43 | Berr |
| 38 | Hugot |
| 38 | Jenkins |
| 40 – 45 | Hames |
| 37 – 40 | Valdés |
| 40 – 45 | Spencer - Meade |
| 38 – 40 | Pedrosas |
| 45 – 50 | Rguez y Delgado |
| 38 | Gallardo |
| 50 | Carrazana |
| 40 – 45 | Morrel |
| 50 | Morera |
| 40 | Mantovani Vaccari |
| 50 – 55 | Minaz |
| 50 – 55 | López |

Fuente: Díaz, T., Domínguez, F. (2004)

CUADRO N° 2.14.- Velocidad de enfriamiento en cristalizadores de acuerdo al tiempo de retención

| Gradiente de enfriamiento (°C/h) | Horas | Autor |
|---|--------------|--------------|
| 0.34 – 0.41 | 72 | Tromp |
| 0.69 – 0.83 | 36 | Borge |
| 0.55 | 45 | Escalona |
| 0.5 – 1 | 36 - 72 | Bruyn |
| 0.59 – 1.07 | 78 - 42 | Castañeda |
| 0.69 – 0.83 | 36 | Awad |
| 1.7 – 2.08 | 12 - 20 | Cardet |
| 1.17 | 21 - 25 | Pedrosas |

| | | |
|-------------|---------|--------|
| 1.19 | 21 | Alemán |
| 1.25 – 1.87 | 16 - 20 | Minaz |

Fuente: Díaz, T., Domínguez, F. (2004)

**CUADRO N° 2.15.- Valores de temperatura de calentamiento
recomendado en los cristalizadores**

| Valores de temperatura recomendada (°C) | Autor |
|--|-----------------|
| 50 – 55 | Hames |
| 40 - 45 | Payne |
| 55 | Ríos |
| 53 – 56 | Rguez y Delgado |
| 55 | Carrasana |

Fuente: Díaz, T., Domínguez, F. (2004)

CUADRO N° 2.16.- Valores de velocidad de agitación en los cristalizadores

| Valores de agitación (rpm) | Autor |
|-------------------------------|-------------------|
| 0.36 -1 | Tuerdochebov |
| 0.33 – 0.5 | Ariosa, Moritsegu |
| 0.25 – 0.5 | López |
| 0.33 | Pedrosas |
| 0.3 – 1.5 | Honing |
| 0.33 | Díaz |
| 0.25 – 0.5 | Herrero |

Fuente: Díaz, T., Domínguez, F. (2004)

CUADRO N° 2.17.- Efectos de los factores que influyen en el proceso de cristalización

| FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE CRISTALIZACIÓN | | EFFECTOS DE ESTOS PARÁMETROS |
|--|--------------------|--|
| Sobresaturación | Menor 1.44 | Conducirá a una alta velocidad de producción de cristales. |
| Viscosidad | 1400 - 1500 Poises | El aumento de esta disminuye la pureza de miel final |
| Rendimientos de Cristales | 35 - 40 | Mayor que el 40% para trabajar adecuadamente. |
| Tamaño del Cristal | 0.25 - 0.35 | Trabajar aún tamaño óptimo para agotar la miel final. |
| Uniformidad de los Cristales | Mayor Pureza | Permite obtener azúcar de bajo grado y de mayor pureza. |
| Pureza de Masa Cocida C | 58 - 60 | Afecta el costo de producción del producto terminado. |
| Impurezas | Libre | Afecta la velocidad de crecimiento de los cristales. |
| Temperatura de Enfriamiento | 40 - 47 ° C | Permite el agotamiento de la miel final. |
| Tiempo de Residencia en los Cristalizadores | 24 - 48 Horas | Es el más alto posible para promover el mayor agotamiento de la masa cocida. |
| Velocidad de Enfriamiento | 0.69 - 0.83 | Logra mantener la sobresaturación lo más alta posible, sin formarse falso grano. |
| Temperatura de Calentamiento | 51,7 - 55 ° C | Disminuye la viscosidad y facilitar la centrifugación. |
| Velocidad de Agitación | 1/ 4 RPM | Favorece la velocidad de cristalización. |

Fuente: Peter Rein (2007)

CUADRO N° 2.18.- Efectos de la variación de la temperatura

| EFFECTOS DE LA VARIACIÓN DE TEMPERATURA | |
|--|--|
| Evaporadores | Se debe trabajar a una temperatura de 49°C - 57 °C, ya que una temperatura mayor a este rango, se quema sacarosa. Temperaturas menores a este rango retrasan el proceso de Evaporación. |
| Tachos | Temperatura mayores a 63 - 70 °C, funden grano. Temperaturas menores a 63 - 70 °C, se producen masas flojas. |
| Cristalizadores | Como resultados de la reducción progresiva de la temperatura, se obtendrá mayor rendimiento de cristales. |

Fuente: Peter Rein (2007)

CAPITULO III

MATERIALES Y

MÉTODOS

3.1 DELIMITACIÓN DEL CAMPO DE ESTUDIO

3.1.1 Método empleado en la investigación

La investigación es descriptiva, exploratoria y retrospectiva

3.1.2 Tipo de investigación

A. De acuerdo al fin que se persigue: Aplicada

B. De acuerdo al diseño de investigación: No experimental, porque no manipulamos deliberadamente variables, se trata de estudios donde no se hace variar en forma intencional las variables independientes para ver su efecto sobre la variable dependiente.

3.1.3 Diseño de la investigación

Los diseños no experimentales se pueden clasificar en transeccionales y longitudinales, nuestro diseño es transeccional del tipo correlación, porque describe las relaciones entre dos o más categorías, y eso es lo que estamos demostrando, la relación existente entre las variables independientes: temperatura y tiempo, con la variable dependiente: pureza en un momento determinado

Se escogió Las variables de Temperatura y tiempo dentro de muchas variables, por la estrecha relación que existe entre ellas, según la investigación; ya que la temperatura es la responsable de obtener mayor rendimiento de cristales y mieles más agotadas y el tiempo es la encargada de promover el mayor agotamiento de la masa cocida.

3.2 LOCALIZACIÓN Y DURACIÓN

La fase de pasantía en la Empresa AGROPUCALA S.A tuvo una duración efectiva de 3 meses desde el mes de diciembre del 2013 hasta marzo del 2014. La fase de diseño y construcción del filtro de Nutsch, equipo que emula la acción de separación de una centrífuga de tercera, se desarrolló en el área de

Maestranza de la fábrica y tuvo una duración de 05 semanas, entre los meses de diciembre y enero del 2014.

La fase experimental tuvo una duración efectiva de 06 semanas entre los meses de febrero y marzo del 2014, la cual se desarrolló en el área de cocimiento y cristalización de la fábrica, lugar donde se instaló el filtro de Nutsch, además se utilizó el laboratorio fisicoquímico de la Empresa AGROPUCALA S.A, donde se realizó los análisis para la caracterización fisicoquímica de las masas de terceras y las mieles de terceras.

3.3 POBLACIÓN Y MUESTRA ESTADÍSTICA DE ESTUDIO

3.3.1 Población

La población total representa en los meses de febrero y marzo de la Zafra 2013-2014 fue de 200 templeas de masa cocida C de la EMPRESA AGROPUCALA S.A.A.

3.3.2 Muestra

Con una población (N= 200 Templeas de masa cocida C), el tamaño de muestra se realiza haciendo uso del programa Excel 2010, se considera un nivel de confianza del 95%; se obtuvo el valor de Z tabulado (Z = 1.96), con una precisión de 5%, se asume que el porcentaje estimado de la muestra es el 95%, por lo tanto "p" = 0.95 y "q" = 0.05, llegando a obtener un tamaño de muestra para nuestro estudio de (n = 53) Templeas de masa cocida C.

$$n = \frac{N * Z_{\alpha}^2 * p * q}{d^2 * (N - 1) + Z_{\alpha}^2 * p * q}$$

$$n = \frac{200 * 1.96^2 * 0.95 * 0.05}{0.05 * (200 - 1) + 1.96^2 * 0.95 * 0.05}$$

$$n = 53$$

3.4 VARIABLES DE ESTUDIO

3.4.1 Variables independientes

- Tiempo de Cristalización (Horas)
- Temperatura de enfriamiento (°C)

3.4.2 Variable dependiente

- Caída de pureza de la miel de tercera (°Pza)

3.5 MATERIALES

3.5.1 Materiales

- Probetas PYREX 1000 ml
- Vasos precipitados PYREX 100, 250, 500 ml
- Hidrómetro Brix
- Termómetro
- Varillas de vidrio
- Pizeta
- Cucharas medidoras
- Jarras de plásticos 600 ml
- Tubo de Polarizar SACCHAROMAT 200 mm
- Embudos
- Papel de filtro

3.5.2 Equipos

- Polarímetro (Marca: SACCHAROMAT - I)
- Balanza Analítica BL 201s (Marca: SARTORIUS)
- Filtro de Nutsch

3.5.3 Reactivos

- Acetato de plomo $\text{Pb}(\text{CH}_3\text{COO})_2$

3.6 METODOLOGÍA

3.6.1 Metodología para el muestreo

El monitoreo de las plantas de masa cocida C se lleva a cabo realizando el muestreo en la línea de entrada y de salida de la batería de los cristalizadores.

En el ingenio azucarero AGROPUCALA se trabaja con dos baterías de cristalizadores, los cuales son denominados **Lado A** y **Lado B**.

- Al **Lado A** le corresponde 9 cristalizadores, desde el cristizador N°01 al cristizador N°09
- Al **Lado B** le corresponde 6 cristalizadores, desde el cristizador N°10 al cristizador N°15

La metodología seguida para el muestreo y análisis de laboratorio se describe a continuación:

i. Muestras seleccionadas

Las muestras para el estudio son seleccionadas para determinar el efecto de la variación del tiempo y la temperatura sobre la pureza de la miel de tercera, durante el recorrido de la planta de masa cocida C en las baterías de los cristalizadores.

A cada muestra de masa y miel de tercera se le realiza el análisis de brix, pol y pureza tanto a la entrada como a la salida de los cristalizadores.

ii. Puntos de muestreo

El programa de muestreo se lleva a cabo en puntos estratégicos del área de cocimiento y cristalización de la fábrica, se toma muestras en los puntos definidos, los cuales son los siguientes:

- **Punto de muestreo N° 1:** Este punto corresponde a la descarga de los Tachos N° 01, 02 y 03, donde la masa cocida C es distribuida para las baterías de cristalizadores sea el **Lado A** o el **Lado B**.
- **Punto de muestreo N° 2:** Este punto corresponde al cristizador N°01, último cristizador de la batería de cristalizadores, que corresponde al **Lado A**.
- **Punto de muestreo N° 3:** Este punto corresponde al cristizador N°15, último cristizador de la batería de cristalizadores, que corresponde al **Lado B**. (Ver Anexo B)

iii. Periodo de muestreo y análisis de laboratorio

Las actividades de muestreo y análisis fisicoquímicos en el laboratorio fueron realizados desde el 10 de Febrero al 24 de Marzo, con excepción de los días 05, 06, 07, 18, 19 y 20 de marzo, que fueron días en que se realizó parada de fábrica para el respectivo mantenimiento de los equipos.

iv. Metodología de muestreo

Las muestras son recolectadas con la ayuda del personal de fábrica. La toma de muestras se lleva a cabo directamente en el punto de descarga de los tachos de tercera a la batería de los cristalizadores, y en los cristalizadores N°01 y N°15, debido al difícil acceso no se podía tomar la muestra directamente, es por ello que se utiliza un toma muestras, el cual consiste en un brazo largo de madera conectado a

un recipiente de acero inoxidable, la muestra recogida es vaciada al recipiente de acero inoxidable.

Para llevar a cabo la evaluación, a cada una de las muestras de masa cocida C se realiza la separación del miel de tercera y de los cristales de azúcar C haciendo uso de un filtro Nutsch, el cual emula la acción de separación de una centrífuga, pero a diferencia de esta última el filtrado Nutsch se realiza únicamente a través de aire comprimido, el cual no genera disolución del grano de sacarosa, permitiendo así evaluar precisamente la composición de la miel de tercera. **(Ver Anexo C)**

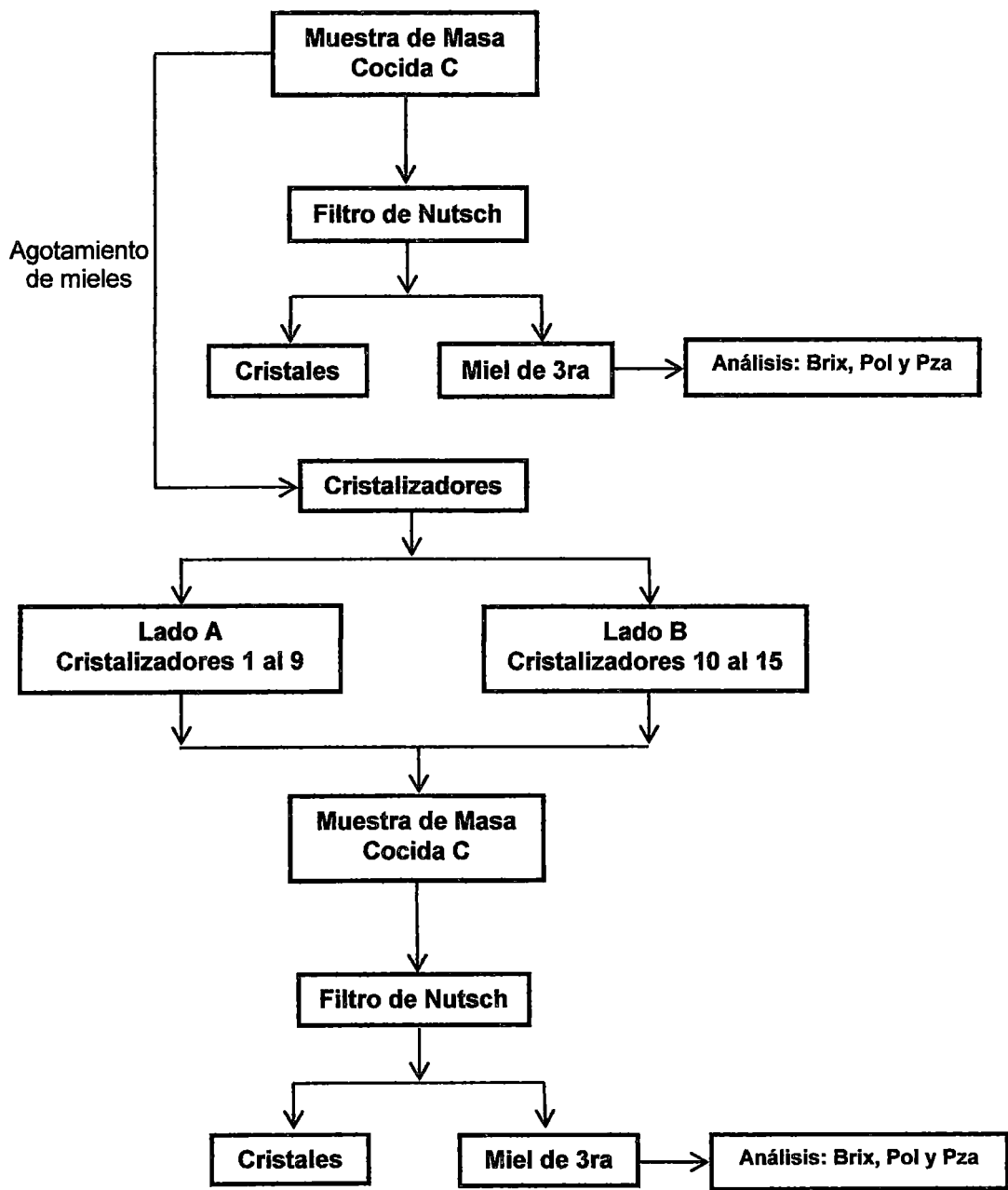
La muestra de miel de tercera es recolectada en recipientes de polipropileno, los cuales fueron llevadas inmediatamente al laboratorio de fábrica para realizarles los análisis fisicoquímicos de brix, pol y pureza.

3.6.2 Diseño Experimental

- i. Cuando se realiza la descarga de la templa de masa cocida C, se registra el tiempo y se toma la muestra de masa cocida C en el punto de muestreo N°01, descarga de los Tachos de tercera hacia la batería de los cristalizadores, se realiza la medición de la temperatura in situ con la ayuda de un termómetro de mercurio con una escala hasta 150 °C con una precisión de $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$.
- ii. Se toma una muestra de 6 Kg de masa cocida C, luego se procede a realizar la separación de la miel de tercera y de los cristales de azúcar haciendo uso de un filtro Nutsch, el tiempo de operación es de 2 horas.
- iii. Una vez separada la masa cocida C en sus constituyentes, se toma muestra de la miel de tercera, la cual es llevada al laboratorio fisicoquímico para medir el brix, pol y pureza.

- iv. Después de haber transcurrido el agotamiento de la masa cocida C, se registra el tiempo y se toma una muestra en el último cristalizador de la batería del lado A (**punto de muestreo N°02**) o lado B (**punto de muestreo N°03**), se realiza la medición de la temperatura situ, con la ayuda del termómetro. En el lado A, el último cristalizador es el N°01 y en el lado B es el N°15.
- v. Se toma una muestra 6 Kg de masa cocida C, luego se procede a realiza la separación de la miel de tercera y de los cristales de azúcar haciendo uso de un filtro Nutsch, el tiempo de operación es de 2 horas.
- vi. Una vez separada la masa cocida C en sus constituyentes, se toma una muestra de la miel de tercera y se lleva al laboratorio para medir el brix, pol, y así obtener la pureza.

FIGURA N° 3.1.- Diagrama de Bloques del procedimiento experimental



Fuente: Elaboración propia

3.6.3 Hipótesis

En la presente investigación las hipótesis quedan definidas de la siguiente manera:

“A mayor tiempo de cristalización es posible obtener mayor caída de pureza en la miel de tercera en la empresa Agropucala S.A.A”

“A menor de temperatura de enfriamiento es posible obtener mayor caída de pureza en la miel de tercera en la empresa Agropucala S.A.A”

3.6.4 Métodos y Variables de estudio en el análisis de laboratorio

i. Variables Fisicoquímicas

- Temperatura
- Polarización (Pol)
- Sólidos solubles (Brix)

Los materiales y equipos de laboratorio empleados para la realización de los análisis fisicoquímicos se muestran en el **Anexo D**.

ii. Métodos de análisis de laboratorio

Los métodos seguidos para realizar los análisis fisicoquímicos de las muestras en el área de los cristalizadores se describen en los apartados siguientes:

- La temperatura fue medida directamente en el punto de muestreo utilizando un termómetro de mercurio.

• **Determinación del Brix**

Grados Brix es el sistema de medición específico, que representa el porcentaje en peso de sacarosa pura, en solución.

En la Industria Azucarera se considera el grado Brix, como el porcentaje de sólidos disueltos y en suspensión, en las soluciones impuras de azúcar.

Fundamento

Este método se basa en la medición de la densidad aparente, dada por la concentración de los sólidos disueltos y en suspensión empleando para el efecto, un hidrómetro con escala en grados Brix y calibrado a 20°C.

Procedimiento

- ✓ Usando una balanza de 2kg de capacidad, tarar un depósito de 800ml. de capacidad.
- ✓ Pesar con exactitud 100g de melaza y añadir luego exactamente 500g de agua destilada fría, completando un peso exacto de muestra y agua de 600 g. (dilución 1:6)
- ✓ Mezclar bien para homogenizar la solución.
- ✓ Vaciar la solución a una probeta de 250 ml. o 500 ml. dejando en reposo por un tiempo mínimo de 30 minutos para la eliminación total de las burbujas de aire.
- ✓ Introducir cuidadosamente el hidrómetro Brix, con escala apropiada, de tal manera que el vástago no se sumerja más de un centímetro de la posición en que debe permanecer estable, flotando libremente, es decir, sin tocar las paredes de la probeta.

- ✓ Tomar la lectura en la parte inferior del menisco, anotando unidades y décimas.
- ✓ Tomar al mismo tiempo la temperatura de la muestra sujeta al análisis.
- ✓ Corregir por temperatura la lectura observada, empleando para el efecto la tabla correspondiente (**Ver Anexo E**).
- ✓ Si la temperatura del jugo es mayor de 20°C, sumar al grado Brix observado, la corrección numérica correspondiente, y si la temperatura es menor, restarla.

Cálculo:

Como la dilución es 1:6 el Brix corregido se multiplica por 6, para obtener el Brix del producto original sin diluir.

$$\% \text{ brix} = (\text{brix leído} + \text{factor de temperatura}) * 6$$

• Determinación de la pol

Pol es el valor determinado por polarización directa del peso normal de un producto azucarado en 100 ml de solución a 20°C, clarificado con Subacetato de plomo cuando es necesario, hecha la lectura en un tubo polarimétrico de 200 mm de longitud, usando un polarímetro dotado de escala internacional (sacarímetro) o equivalente. El término "Pol" se considera una entidad real para todos los efectos de cálculo.

Fundamento

Se basa en la medición de la propiedad que tienen las soluciones de sacarosa de hacer girar el plano de polarización de un rayo de luz, siendo este giro proporcional a la cantidad de sacarosa presente en solución.

Procedimiento

- ✓ Usando una balanza de 2kg de capacidad, tarar un depósito de 800ml. de capacidad.
- ✓ Pesar con exactitud 100g de melaza y añadir luego exactamente 500g de agua destilada fría, completando un peso exacto de muestra y agua de 600 g. (dilución 1:6)
- ✓ Mezclar bien para homogenizar la solución.
- ✓ Para la melaza se agregan 8 g de acetato de plomo, algunas melazas pueden dar soluciones muy oscuras para la polarización a la concentración indicada.
- ✓ Agitar y luego filtrar con papel filtro colocados en un embudo sin vástago sobre un vaso de precipitados, descartar los primeros 15 ml. de filtrado.
- ✓ Transferir el filtrado al tubo de polarizar de 200 mm, lavando previamente con la misma solución unas tres veces; inmediatamente leer el Pol y tomar la temperatura de la solución.
- ✓ Con la lectura obtenida y con el uso de tablas se determina el Pol.

- **Determinación de la Pureza**

El grado de pureza de las muestras de jugo se determinó mediante cálculo, empleando la ecuación

$$\% \text{ pureza} = \frac{\% \text{ pol}}{\% \text{ brix}} * 100$$

CUADRO Nº 3.1.- La determinación versus el método standart de análisis empleado

| ANÁLISIS | METODO STÁNDART |
|-----------------|-------------------------------|
| POL | ICUMSA - Method GS4-1 (1994) |
| BRIX | ICUMSA - Method GS4-15 (1994) |

Fuente: ICUMSA (2005)

3.7 ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Los resultados experimentales fueron procesados utilizando el programa estadístico SPSS Statistics 22.

A los datos experimentales, se les realizó una regresión múltiple paso a paso, tomando como variable dependiente la caída de pureza, y como independientes, las variaciones de temperatura y tiempo de cristalización, además se realizó una regresión simple entre las variables.

Es importante saber si este modelo es adecuado y cuál o cuáles de las variables independientes son importantes o significativas. Para saber esto se efectúan pruebas de hipótesis para ver si hay una relación lineal entre la variable dependiente y las variables independientes.

Para llevar a cabo una buena interpretación del modelo de regresión, debemos acompañar siempre a nuestro estudio, el diagnóstico y validación del modelo. Dicho diagnóstico consiste en analizar si se verifican las hipótesis básicas del modelo: linealidad, independencia, normalidad, homocedasticidad y no-colinealidad.

CAPITULO IV

RESULTADOS

Y DISCUSIÓN

El número de muestras realizadas fue de 53 templeas de masa cocida C, para llevar a cabo la evaluación, a cada una de las muestras de masa cocida C, tomadas en los puntos de muestreo, se les separó en miel de tercera y en cristales de azúcar C empleando el filtro de Nutsch.

Una vez separada la masa cocida en sus constituyentes, se evaluó la pureza de la miel de tercera, con el fin de medir el efecto de las variables independientes sobre la misma.

En el ingenio azucarero AGROPUCALA se trabaja con dos baterías de cristalizadores, el **Lado A** que tiene 9 cristalizadores y el **Lado B** que tiene 6 cristalizadores, debido a la diferencia en el número de cristalizadores, se realizó la evaluación en ambos lados independientemente, basada en la caracterización de la miel de tercera en condiciones iniciales y finales del proceso de cristalización por enfriamiento.

Los resultados de la caracterización de 26 muestras de masa cocida C y miel de tercera al inicio y final del proceso de cristalización por enfriamiento, constituyen el conjunto de datos experimentales del **Lado A**, que se muestran en las **Tabla F.1 y Tabla F.2** y las 27 muestras de masa cocida C y miel de tercera al inicio y final del proceso de cristalización por enfriamiento, constituyen el conjunto de datos experimentales del **Lado B**, que se muestran en las **Tabla F.3 y Tabla F.4**.

De los datos de la **Tabla F.1 (*Características de la masa cocida al inicio del proceso en el lado A*)**, se obtiene que las templeas de masa cocida C son descargadas a una temperatura que oscila entre **65 – 78 °C**, brix oscila entre **98.16 – 99.96 %**, pol oscila entre **52.15 – 58.88%** y pureza oscila entre **55.90 – 58.97 %**, y la miel de tercera con brix que oscila entre **95.00 – 97.90%**, pol oscila entre **36.39 – 40.82%** y pureza oscila entre **37.40 – 42.40%**.

De los datos de la **Tabla F.3 (*Características de la masa cocida al inicio del proceso en el lado B*)**, se obtiene que las templeas de masa cocida C son descargadas a una temperatura que oscila entre **69 - 77 °C**, brix oscila entre **99.54 – 99.96%**, pol oscila entre **51.85 - 58.86%** y pureza oscila entre **51.93 – 58.88%**, y la miel de tercera con brix que oscila entre **92.82 – 98.36%**, pol oscila entre **35.90 – 40.79%** y pureza oscila entre **38.51 – 41.92%**.

De acuerdo a los datos se deduce que el trabajo realizado en tachos es regular, ya que algunos parámetros evaluados, coinciden con la teoría y otros trabajos de investigación, puesto que las características de la masa cocida C y la miel de

tercera al inicio del proceso, tanto en el Lado A y Lado B , son aceptables, para empezar la temperatura de descarga debe estar en un rango de 65 – 70 °C que es lo recomendado, en nuestros datos el 42% están en el rango y el 58% están fuera del rango recomendado en el Lado A y por el contrario en el Lado B un 26% están en el rango y el 74% están fuera del rango recomendado; los valores de brix están muy cercanos a lo recomendable (100%), ya que el 96% están cerca al brix recomendado y sólo 4% está fuera del rango en el Lado A, y en el Lado B cumple en su totalidad con lo recomendado; puesto que cuanto mayor sea el contenido de sólidos totales (Brix) de la masa cocida, menor serán las pérdidas de azúcar en miel final; los valores de pureza, lo recomendado es trabajar en un rango de 58 – 60 % de pureza según Hugot, en nuestros datos sólo 7% se encuentran en el rango y el 93% están fuera del rango tanto para el Lado A y para el Lado B.

De los datos de la **Tabla F.2 (*Características de la masa cocida al final del enfriamiento en el lado A*)**, se obtiene que las templeas de masa cocida C a la salida de la batería de los cristalizadores son descargadas a una temperatura que oscila entre 35 - 47 °C, brix que oscila entre 94.62 - 97.76%, pol oscila entre 49.63 - 55.14% y pureza oscila entre 51.76 – 56.40%, y la miel de tercera con brix oscila entre 95.04 – 97.08%, pol oscila entre 32.29 – 37.28% y pureza oscila entre 32.69 – 38.49%.

De los datos de la **Tabla F.4 (*Características de la masa cocida al final del enfriamiento en el lado B*)**, se obtiene que las templeas de masa cocida C a la salida de la batería de los cristalizadores son descargadas a una temperatura que oscila entre 33 - 54 °C, brix que oscila entre 92.64 – 97.08 %, pol que oscila entre 54.33 – 47.40% y pureza que oscila entre 51.16 – 56.44%, y la miel de tercera con brix que oscila entre 90.42 – 97.08%, pol que oscila entre 33.21- 36.71% y pureza que oscila entre 34.76 – 38.13%.

En la parte de la descarga de la templea del cristalizador, los parámetros fisicoquímicos, de acuerdo a los datos del lado A y lado B, es la continuación de un trabajo regular en el área de Tachos ya que los parámetros evaluados, siguen coincidiendo con la teoría y otros trabajos de investigación, puesto que las características de la masa cocida al inicio y final del proceso tanto en el Lado A y Lado B, como es brix, pol y pureza son datos aceptables. La temperatura final de la masa cocida descargada del cristalizador debe estar entre 40 – 47 °C, del cual de nuestra base de datos el 73% están en el rango y el 27 % están por debajo del

rango en el lado A y en el Lado B el 73% están en el rango y el 27 % de los datos están fuera del rango, trabajar con la temperatura recomendada permitirá calentar adecuadamente y sin ningún costo innecesario de energía, ya que nos ayudara a llegar de forma rápida a la temperatura de calentamiento; estamos en un brix por debajo de lo recomendable (98) en la descarga del cristizador, ya que el 100% está fuera de lo recomendado en el Lado A y en el Lado B, respecto a la pureza se puede decir que mientras sea más baja se obtiene mayor agotamiento de mieles, de los datos podemos decir que el 96% son aceptables y que el 4% son purezas altas A, y en el Lado B el 93% están son datos aceptables y el 7% son purezas altas

4.1 REGRESIÓN LINEAL MÚLTIPLE

La regresión lineal múltiple estima los coeficientes de la ecuación lineal, con una o más variables independientes, que mejor predigan el valor de la variable dependiente. Se usó la regresión lineal múltiple para predecir la caída de pureza a partir de las variables independientes.

Para realizar la regresión lineal múltiple se tuvieron en cuenta las siguientes variables:

- ✓ **x1: Δ Temperatura ($T_{descarga} - T_{salida}$)** - Variación de temperatura de la masa cocida C descargada de los tachos de tercera y de la salida de los cristalizadores.
- ✓ **X2: Δ Tiempo ($T_{final} - T_{inicial}$)** – Tiempo de agotamiento de mieles en los cristalizadores.
- ✓ **Y: Δ Pureza ($P_{za\ descarga} - P_{za\ salida}$)** – Caída de pureza de la miel de tercera descargada de los tachos y de la salida de los cristalizadores

En la **Tabla 4.1** se muestran los datos de las variables independientes y dependiente, que constituyen el conjunto de datos experimentales del **Lado A**. La variación de la temperatura oscila entre 23 y 39 °C, el tiempo de agotamiento de mieles se enfrió entre 7.5 y 23.83 horas y la caída de pureza de la miel de tercera en los cristalizadores osciló entre 3.92 y 5.86 unidades.

En la **Tabla 4.2** se muestran los datos de las variables independientes y dependiente, que constituyen el conjunto de datos experimentales del Lado B. La variación de la temperatura oscila entre 18 y 37 °C, el tiempo de agotamiento de mieles se enfrió entre 9.08 y 33.83 horas y la caída de pureza de la miel de tercera en los cristalizadores osciló entre 3.47 y 4.97 unidades.

El objetivo del enfriamiento de la masa cocida en los cristalizadores es que la sacarosa que aún se mantiene disuelta en el licor madre sea adsorbida por los cristales formados. Un enfriamiento deficiente afectara este proceso y el recobrado de azúcar será menor, incrementándose las pérdidas en mieles, por lo cual observando los datos obtenidos, podemos decir que la variación de temperatura , en este caso el 58% de los datos están en el rango recomendado y el 42% están por debajo del rango en el Lado A y en el Lado B el 63% está en el rango y el 37% está fuera del rango; lo mismo ocurre con la variación del tiempo, lo adecuado es trabajar entre 24 – 48 horas, pero en nuestra caso podemos observar que el 4% están en el rango y el 96% están fuera del rango en el Lado A y en el Lado B sólo el 8% está en el rango y el 92% está por debajo del rango, y no es porque no estemos trabajando adecuadamente, sino porque a veces por falta de material (semilla) en el área tachos se dispone a descargar esas templan a esa temperatura, por requerimiento del proceso; esto no ocurre todo los días, dependerá del avance requerido en el ingeniero azucarero y de la dinámica de producción. De esta manera se tome el riesgo que la templa descargada, a la cual se interrumpió el proceso de enfriamiento, traiga como consecuencia disminución en la caída de pureza. La diferencia de purezas, entre las mieles de la templa que ingresa al cristalizador y la que sale, es un índice indicativo excelente para medir la eficiencia en el trabajo en tachos y cristalizadores. Valores bajos en las caídas de pureza ocasionaran menor recobrado y pérdidas más altas en mieles finales. Si se mantienen un control correcto en la operación de los tachos y cristalizadores, no deben de producirse pérdidas adicionales de azúcar. En nuestro caso podemos observar caídas de pureza muy bajas respecto a lo recomendado de 5 a 6 puntos en estos tipos cristalizadores, podemos observar que el 23% está en el rango y el 77% está por debajo del rango en el Lado A y en el Lado B todos los datos están por debajo del rango. Es por eso la importancia de analizar la influencia del efecto de estas variables como es la

variación del tiempo y de la temperatura sobre la pureza de miel de tercera, ya que esta última, representa una gran pérdida del ingenio que se representa en dinero.

Al realizar el análisis usando la regresión múltiple con estimación lineal, para el **Lado A** se obtuvo un coeficiente de determinación R^2 de 0.768, como el valor es cercano a 1, nos indica que la mayoría de la variabilidad fue captada o explicada por la ecuación, el 76.8 % de la pureza de miel tercera esta explicada por la variación de temperatura y el tiempo de cristalización, la variación no explicada es 23.2%, el coeficiente de correlación múltiple R es 0.877 y el coeficiente de determinación R^2 ajustado es 0.748. (**Tabla 4.3**).

Para el **Lado B** se obtuvo un coeficiente de determinación R^2 de 0.890, como el valor es cercano a 1, nos indica que la mayoría de la variabilidad fue captada o explicada por la ecuación, el 89.0% de la pureza de miel tercera esta explicada por la variación de temperatura y el tiempo de cristalización, la variación no explicada es 11.0%, el coeficiente de correlación múltiple R es 0.944 y el coeficiente de determinación R^2 ajustado es 0.881. (**Tabla 4.4**).

Los coeficientes de determinación y correlación obtenidos indican que los modelos de regresión son bastante buenos, se expresa que la proporción de varianza de la variable dependiente está explicada por las variables independientes.

El error típico de estimación es la raíz cuadrada de la media cuadrática residual, representa una medida de la parte de variabilidad de la variable dependiente que no es explicada por la recta de regresión, para el modelo de regresión lineal múltiple en el **Lado A** se obtiene un error típico de 0.27841 (**Tabla 4.3**) y para el modelo de regresión lineal múltiple en el **Lado B** se obtiene un error típico de 0.12535 (**Tabla 4.4**). En los modelos de regresión lineal múltiple se obtiene errores típicos pequeños, lo que nos indica que los modelos tienen un buen ajuste.

La tabla resumen ANOVA nos informa sobre si existe o no relación significativa entre las variables. El estadístico F permite contrastar la hipótesis nula de que el valor poblacional de R es cero y por tanto nos permite decidir si existe relación lineal significativa entre la variable dependiente y el conjunto de variables independientes tomadas juntas.

$$\begin{array}{l}
 H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0 \\
 H_1 : \text{Algún } \beta_i \neq 0
 \end{array}
 \longleftrightarrow
 \begin{array}{l}
 H_0 : R = 0 \\
 H_1 : R \neq 0
 \end{array}$$

La columna Sig, corresponde al valor de probabilidad de F. Es la probabilidad de obtener el valor de F si la hipótesis nula fuera cierta. El valor del nivel crítico Sig = 0.000 indica que si existe relación lineal significativa.

En la **Tabla 4.5** que corresponde a la ANOVA en el **Lado A** el valor de significancia es 0.000, al igual que en la **Tabla 4.6** que corresponde a la ANOVA en el **Lado B** el valor de significancia es 0.000, como dichos valores son menores que 0,05, por lo tanto se rechaza la hipótesis nula y se concluye que los modelos de regresión para ambos lados, A y B, son válidos además ofrecen un buen ajuste en la nube de puntos y admitimos que la variable dependiente y las variables independientes se encuentran relacionadas linealmente.

La tabla de coeficientes no estandarizados contiene toda la información necesaria para construir la ecuación de la recta de regresión múltiple. En la columna encabezada *Coeficientes no estandarizados* se encuentran los coeficientes (β_k) que forman parte de la ecuación en puntuaciones directas.

Las ecuaciones de regresión lineal múltiple son:

✓ **En el Lado A:**

$$Y = 2.083 + 0.059 X_1 + 0.056 X_2 \text{ (Tabla 4.7)}$$

.

✓ **En el Lado B:**

$$Y = 2.439 + 0.029 X_1 + 0.046 X_2 \text{ (Tabla 4.8)}$$

TABLA 4.1.- Variación de Temperatura, Tiempo y Pureza de miel de tercera en el Lado A

| N° | Lado | Tacho | ΔT °C | Δ Tiempo Enfriamiento (H) | Δ Pza Miel | Δ°C/h |
|--------------|-------------|--------------|---------------------------------|--|---|--------------------------------|
| 1 | A | 3 | 30 | 18.92 | 4.70 | 1.59 |
| 2 | A | 3 | 33 | 17.50 | 5.26 | 1.89 |
| 3 | A | 3 | 36 | 23.83 | 5.86 | 1.51 |
| 4 | A | 3 | 30 | 20.00 | 4.78 | 1.50 |
| 5 | A | 2 | 38 | 23.00 | 5.60 | 1.65 |
| 6 | A | 2 | 25 | 12.00 | 4.56 | 2.08 |
| 7 | A | 3 | 28 | 20.33 | 5.46 | 1.38 |
| 8 | A | 2 | 26 | 8.42 | 3.92 | 3.09 |
| 9 | A | 2 | 30 | 15.50 | 4.32 | 1.94 |
| 10 | A | 1 | 26 | 11.33 | 4.55 | 2.29 |
| 11 | A | 2 | 25 | 8.67 | 4.04 | 2.88 |
| 12 | A | 3 | 39 | 23.17 | 5.71 | 1.68 |
| 13 | A | 1 | 26 | 9.92 | 4.18 | 2.62 |
| 14 | A | 2 | 33 | 21.00 | 5.24 | 1.57 |
| 15 | A | 3 | 28 | 22.00 | 4.48 | 1.27 |
| 16 | A | 3 | 32 | 18.25 | 4.85 | 1.75 |
| 17 | A | 3 | 28 | 7.50 | 4.12 | 3.73 |
| 18 | A | 2 | 25 | 15.00 | 4.33 | 1.67 |
| 19 | A | 3 | 32 | 17.17 | 4.72 | 1.86 |
| 20 | A | 2 | 23 | 9.25 | 4.20 | 2.49 |
| 21 | A | 3 | 32 | 17.75 | 4.84 | 1.80 |
| 22 | A | 2 | 26 | 14.83 | 4.40 | 1.75 |
| 23 | A | 3 | 31 | 21.50 | 5.26 | 1.20 |
| 24 | A | 3 | 30 | 14.58 | 4.14 | 2.06 |
| 25 | A | 1 | 28 | 13.42 | 4.21 | 2.09 |
| 26 | A | 2 | 33 | 12.67 | 4.96 | 2.61 |
| Media | | | 29.73 | 16.06 | 4.72 | 2.00 |
| Min. | | | 23.00 | 7.50 | 3.92 | 1.20 |
| Max. | | | 39.00 | 23.83 | 5.86 | 3.73 |

Fuente: Elaboración Propia

TABLA 4.2.- Variación de Temperatura, Tiempo y Pureza de miel de tercera en el Lado B

| N° | Lado | Tacho | ΔT °C | Tiempo Enfriamiento (H) | Δ Pza Miel | Δ °C/h |
|-------|------|-------|---------------|----------------------------|----------------------|---------------|
| 1 | B | 1 | 32 | 17.83 | 4.07 | 1.79 |
| 2 | B | 3 | 23 | 12.58 | 3.47 | 1.83 |
| 3 | B | 3 | 25 | 15.83 | 3.83 | 1.58 |
| 4 | B | 3 | 36 | 20.00 | 4.34 | 1.80 |
| 5 | B | 2 | 31 | 17.83 | 4.29 | 1.74 |
| 6 | B | 1 | 30 | 20.25 | 4.24 | 1.48 |
| 7 | B | 1 | 18 | 13.50 | 3.84 | 1.33 |
| 8 | B | 3 | 32 | 15.25 | 4.29 | 2.10 |
| 9 | B | 1 | 25 | 16.50 | 3.81 | 1.52 |
| 10 | B | 1 | 24 | 11.78 | 3.70 | 2.04 |
| 11 | B | 3 | 30 | 16.83 | 4.16 | 1.78 |
| 12 | B | 1 | 25 | 11.83 | 3.79 | 2.11 |
| 13 | B | 3 | 26 | 15.25 | 4.05 | 1.70 |
| 14 | B | 3 | 26 | 15.87 | 3.87 | 1.64 |
| 15 | B | 3 | 30 | 22.17 | 4.34 | 1.35 |
| 16 | B | 3 | 37 | 33.83 | 4.97 | 1.09 |
| 17 | B | 2 | 26 | 16.67 | 4.09 | 1.56 |
| 18 | B | 2 | 23 | 15.50 | 3.76 | 1.48 |
| 19 | B | 2 | 27 | 9.08 | 3.68 | 2.97 |
| 20 | B | 3 | 22 | 11.50 | 3.47 | 1.91 |
| 21 | B | 2 | 24 | 11.50 | 3.72 | 2.09 |
| 22 | B | 3 | 26 | 12.75 | 3.73 | 2.04 |
| 23 | B | 3 | 30 | 23.42 | 4.36 | 1.28 |
| 24 | B | 3 | 29 | 20.17 | 4.24 | 1.44 |
| 25 | B | 1 | 25 | 11.67 | 3.56 | 2.14 |
| 26 | B | 1 | 26 | 12.50 | 3.58 | 2.08 |
| 27 | B | 1 | 32 | 23.92 | 4.57 | 1.34 |
| Media | | | 27.41 | 16.51 | 3.99 | 1.75 |
| Mín. | | | 18.00 | 9.08 | 3.47 | 1.09 |
| Max. | | | 37.00 | 33.83 | 4.97 | 2.97 |

Fuente: Elaboración Propia

TABLA 4.3.- Resumen del modelo de regresión lineal múltiple en el Lado A

| Modelo | R | R cuadrado | R cuadrado corregida | Error típ. de la estimación | Cambio en R cuadrado | Estadísticos de cambio | | | Sig. Cambio en F | Durbin-Watson |
|--------|------|------------|----------------------|-----------------------------|----------------------|------------------------|-----|-----|------------------|---------------|
| | | | | | | Cambio en F | gl1 | gl2 | | |
| 1 | ,877 | ,768 | ,748 | ,27841 | ,768 | 38,140 | 2 | 23 | ,000 | 1,950 |

Fuente: Elaboración Propia

TABLA 4.4.- Resumen del modelo de regresión lineal múltiple en el Lado B

| Modelo | R | R cuadrado | R cuadrado corregida | Error típ. de la estimación | Cambio en R cuadrado | Estadísticos de cambio | | | Sig. Cambio en F | Durbin-Watson |
|--------|-------------------|------------|----------------------|-----------------------------|----------------------|------------------------|-----|-----|------------------|---------------|
| | | | | | | Cambio en F | gl1 | gl2 | | |
| 1 | ,944 ^a | ,890 | ,881 | ,12531 | ,890 | 97,364 | 2 | 24 | ,000 | 1,725 |

Fuente: Elaboración Propia

TABLA 4.5.- ANOVA en el Lado A

| | Modelo | Suma de cuadrados | Gl | Media cuadrática | F | Sig. |
|---|---------------|------------------------------|-----------|-----------------------------|----------|-------------------|
| | Regresión | 5,913 | 2 | 2,956 | 38,140 | ,000 ^b |
| 1 | Residual | 1,783 | 23 | ,078 | | |
| | Total | 7,696 | 25 | | | |
| a. Variable dependiente: Pureza | | | | | | |
| b. Variables predictoras: (Constante), Tiempo, Temperatura | | | | | | |

Fuente: Elaboración Propia

TABLA 4.6.- ANOVA en el Lado B

| | Modelo | Suma de cuadrados | Gl | Media cuadrática | F | Sig. |
|---|---------------|------------------------------|-----------|-----------------------------|----------|-------------------|
| | Regresión | 3,058 | 2 | 1,529 | 97,364 | ,000 ^b |
| 1 | Residual | ,377 | 24 | ,016 | | |
| | Total | 3,435 | 26 | | | |
| a. Variable dependiente: Pureza | | | | | | |
| b. Variables predictoras: (Constante), Tiempo, Temperatura | | | | | | |

Fuente: Elaboración Propia

Los estadísticos t y sus niveles críticos (Sig) nos permiten contrastar las hipótesis nulas de que los coeficientes de regresión valen cero en la población. Niveles críticos (Sig) muy pequeños (generalmente menores que 0.05) indican que debemos rechazar la hipótesis nula.

$$\begin{array}{l} H_0 : \beta_j = 0 \\ H_1 : \beta_j \neq 0 \end{array}$$

Un coeficiente igual a cero indica ausencia de relación lineal, de modo que los coeficientes significativamente distintos de cero nos informan sobre que las variables son relevantes en la ecuación de regresión. Observando el nivel crítico asociado a cada prueba t , en la **Tabla 4.7**, corresponde al modelo de regresión lineal múltiple en el **Lado A**, vemos que las tres variables utilizadas poseen coeficientes significativamente distintos de cero (en todas, Sig son menores a 0.05) y en la **Tabla 4.8**, que corresponde al **Lado B**, vemos que también las tres variables utilizadas poseen coeficientes significativamente distintos de cero (en todas, Sig son menores a 0.05), por lo tanto se rechaza la hipótesis nula y se concluye que para ambos lados, A y B, las variables independientes contribuyen de forma significativa a explicar lo que ocurre con la variable dependiente.

Los residuos son muy importantes en el análisis de regresión, ya que nos informan sobre el grado de exactitud de los pronósticos: cuanto más pequeño es el error típico de los residuos, mejores son los pronósticos, es decir que mejor se ajusta la recta de regresión a la nube de puntos.

En la **Tabla 4.9** y **Tabla 4.10** se ofrece un resumen con información sobre el valor máximo y mínimo, la media y la desviación típica de los pronósticos, de los residuos, de los pronósticos tipificados y de los residuos tipificados, en ambos lados A y B se obtiene que las medias de los residuos valen cero.

El análisis de los residuales nos va a permitir no solo profundizar en la relación que se produce entre las variables, sino también, ponderar la bondad de ajuste de la regresión obtenida.

TABLA 4.7.- Coeficientes en el Lado A

| Modelo | Coeficientes no estandarizados | | Coeficientes tipificados | t | Sig. | Estadísticos de colinealidad | |
|---------------------------------|--------------------------------|------------|--------------------------|-------|------|------------------------------|-------|
| | B | Error típ. | Beta | | | Tolerancia | FIV |
| (Constante) | 2,083 | ,443 | | 4,706 | ,000 | | |
| 1 Temperatura | ,059 | ,020 | ,434 | 2.925 | ,004 | ,457 | 2.188 |
| Tiempo | ,056 | ,016 | ,506 | 3,408 | ,002 | ,457 | 2.188 |
| a. Variable dependiente: Pureza | | | | | | | |

Fuente: Elaboración Propia

TABLA 4.8.- Coeficientes en el Lado B

| Modelo | Coeficientes no estandarizados | | Coeficientes tipificados | t | Sig. | Estadísticos de colinealidad | |
|---------------------------------|--------------------------------|------------|--------------------------|--------|------|------------------------------|-------|
| | B | Error típ. | Beta | | | Tolerancia | FIV |
| (Constante) | 2,439 | ,168 | | 14,535 | ,000 | | |
| 1 Temperatura | ,029 | ,008 | ,346 | 3,433 | ,002 | ,449 | 2,226 |
| Tiempo | ,046 | ,007 | ,658 | 6,518 | ,000 | ,449 | 2,226 |
| a. Variable dependiente: Pureza | | | | | | | |

Fuente: Elaboración Propia

TABLA 4.9.- Estadísticos sobre los residuos en el Lado A

| | Mínimo | Máximo | Media | Desviación típica | N |
|-------------------------|---------|--------|--------|-------------------|----|
| Valor pronosticado | 3,9452 | 5,6581 | 4,7188 | ,48633 | 26 |
| Residual | -,51221 | ,60435 | ,00000 | ,26705 | 26 |
| Valor pronosticado tip. | -1,591 | 1,931 | ,000 | 1,000 | 26 |
| Residuo típ. | -1,840 | 2,171 | ,000 | ,959 | 26 |

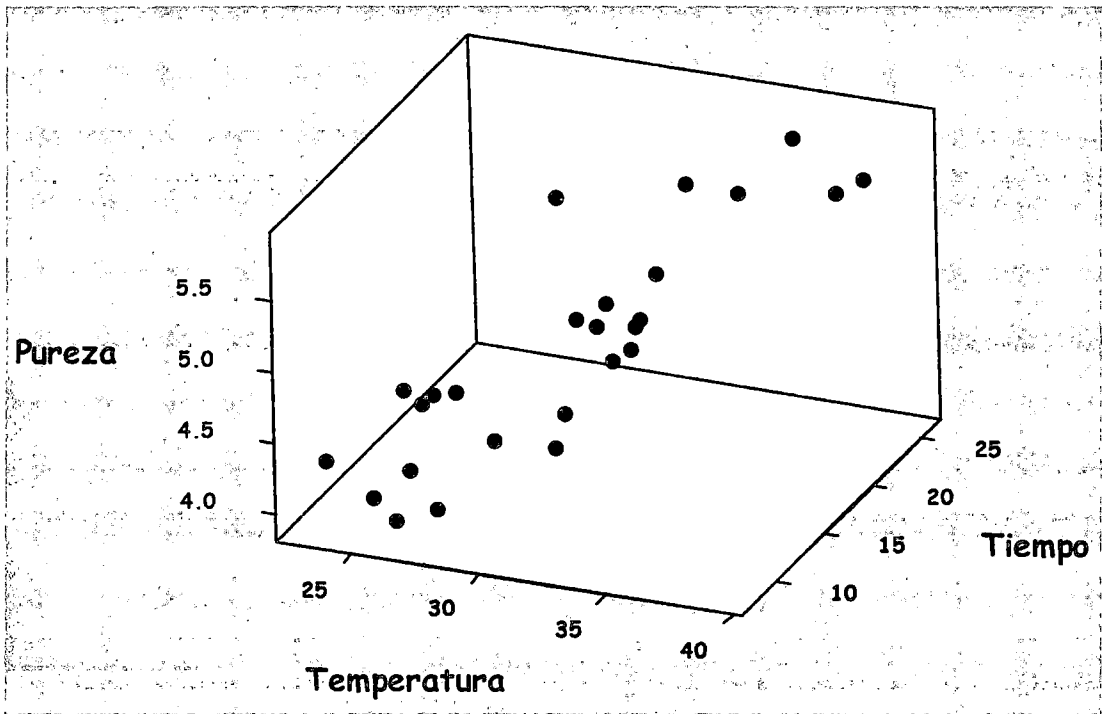
Fuente: Elaboración Propia

TABLA 4.10.- Estadísticos sobre los residuos en el Lado B

| | Mínimo | Máximo | Media | Desviación típica | N |
|-------------------------|---------|--------|--------|-------------------|----|
| Valor pronosticado | 3,5814 | 5,0646 | 3,9933 | ,34294 | 27 |
| Residual | -,21512 | ,25863 | ,00000 | ,12039 | 27 |
| Valor pronosticado tip. | -1,201 | 3,124 | ,000 | 1,000 | 27 |
| Residuo típ. | -1,717 | 2,064 | ,000 | ,961 | 27 |

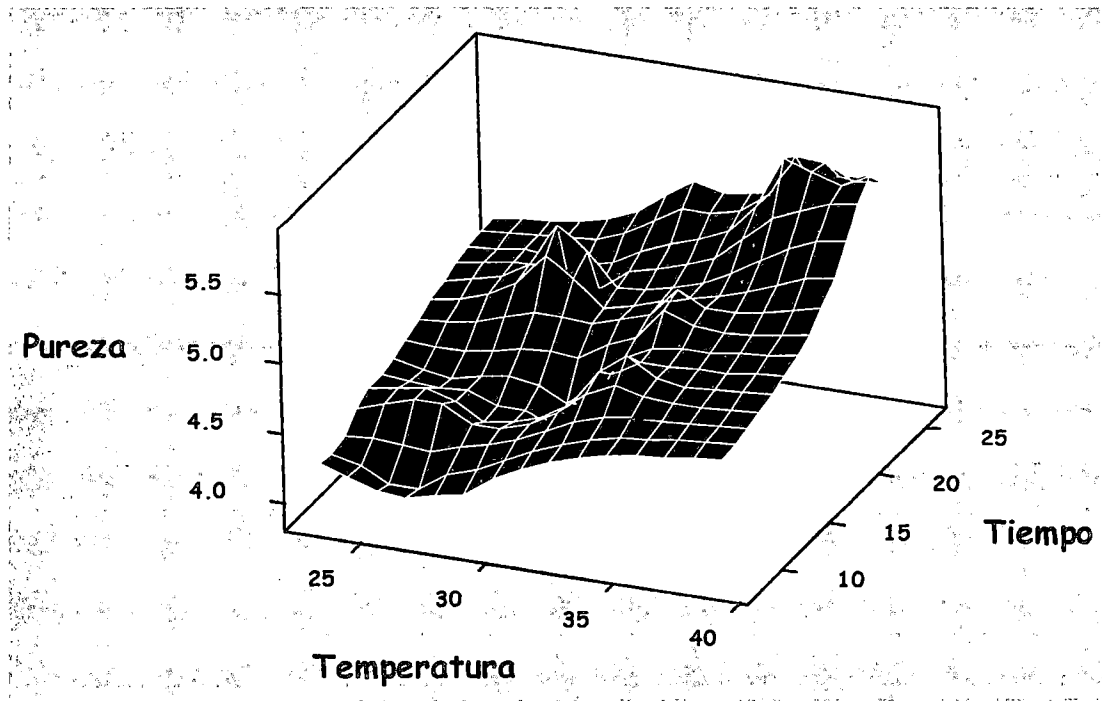
Fuente: Elaboración Propia

GRÁFICO N° 4.1.- Dispersión 3D de Pureza vs Temperatura, Tiempo en el Lado A



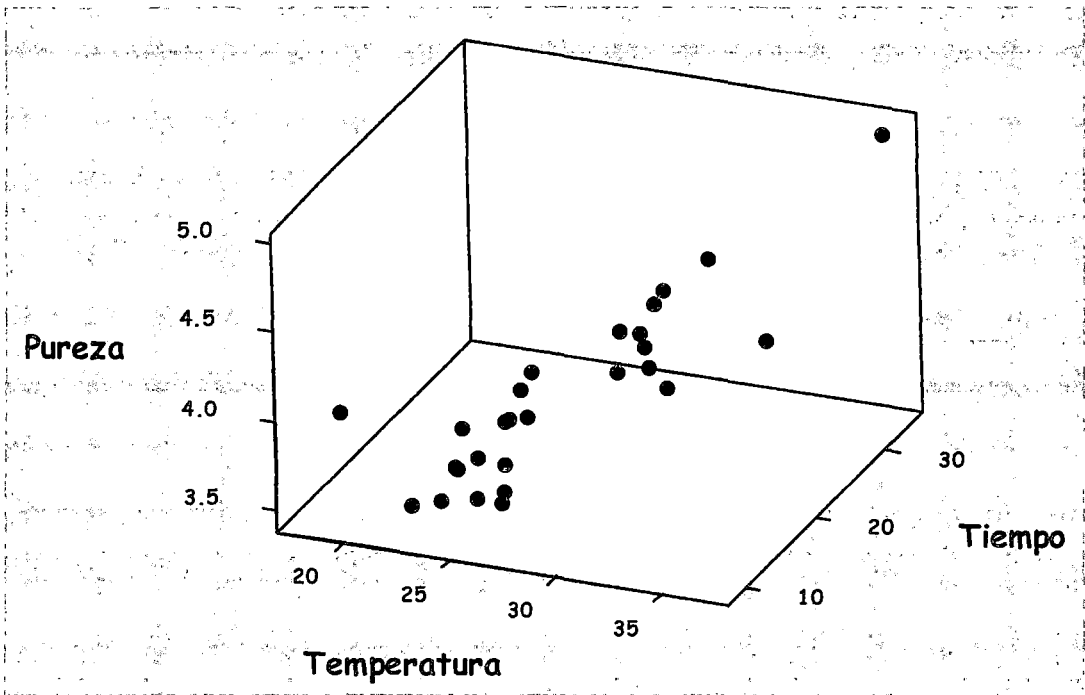
Fuente: Elaboración propia

GRÁFICO N° 4.2.- Superficie de Pureza vs Temperatura, Tiempo en el Lado A



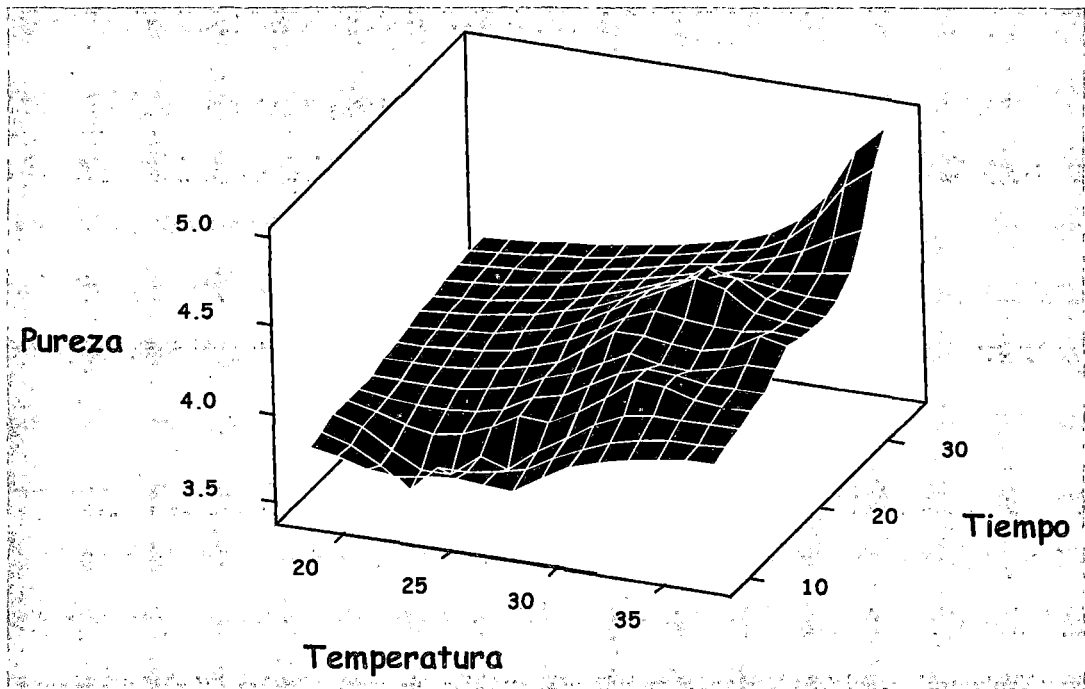
Fuente: Elaboración propia

GRÁFICO N° 4.3.- Dispersión 3D de Pureza vs Temperatura, Tiempo en el Lado B



Fuente: Elaboración propia

GRÁFICO N° 4.4 Superficie de Pureza vs Temperatura, Tiempo en el Lado A



Fuente: Elaboración propia

Como ya hemos comentado los residuos, "e", son la estimación de los verdaderos errores. En regresión lineal la distribución de la variable formada por los residuos debe ser Normal, esto es, los residuos observados y los esperados bajo hipótesis de distribución normal deben ser parecidos.

La hipótesis para la prueba de normalidad fue:

Ho: los datos siguen una distribución normal

H1: los datos no siguen una distribución normal

Para contrastar la hipótesis lo realizamos mediante la prueba de Kolmogorov Smirnov, para ello comprobamos el nivel de significancia, si es menor que 0.05 la distribución no es normal, si es mayor que 0.05 la distribución es normal.

La **Tabla 4.11**, que corresponde al **Lado A**, se obtiene el Sig = 0.901 y en la **Tabla 4.12**, que corresponde al **Lado B**, se obtiene el Sig = 0.919, en ambos casos los valores son mayores a 0.05, por lo tanto se acepta la hipótesis nula y se concluye que los datos siguen una distribución normal.

Gráficamente también se comprueba si los residuos tipificados se aproximan a una distribución normal, para ello utilizamos el gráfico de distribución de frecuencias (histograma) de valores de los residuos, que nos permite comprobar gráficamente la hipótesis de normalidad.

En la **Figura 4.5** se observa, que el histograma posee una distribución acampanada uniforme, pero presenta una laguna en las colas y en la **Figura 4.6** también se observa un histograma con distribución acampanada uniforme, ambas figuras nos indica que los residuos están distribuidos normalmente.

El gráfico de probabilidad normal muestra información parecida a la del histograma, en el eje horizontal se representan los valores de la probabilidad acumulada que corresponde a cada residuo tipificado y el eje vertical representa la probabilidad acumulada teórica que corresponde a una distribución normal típica.

En la **Figura 4.7 (Lado A)** y en la **Figura 4.8 (Lado B)** se observa que la nube de puntos se encuentran aproximadamente alineada sobre la diagonal de los gráficos, en ambas figuras nos indica que los residuos se distribuyen normalmente.

TABLA 4.11.- Prueba de Kolmogorov – Smirnov en el Lado A

| | | Standardized Residual |
|---|-------------------|-----------------------|
| N | | 26 |
| Parámetros normales ^{a,b} | Media | ,0000000 |
| | Desviación típica | ,95916630 |
| Diferencias más extremas | Absoluta | ,112 |
| | Positiva | ,112 |
| | Negativa | -,083 |
| Z de Kolmogorov-Smirnov | | ,570 |
| Sig. asintót. (bilateral) | | ,901 |
| a. La distribución de contraste es la Normal. | | |
| b. Se han calculado a partir de los datos. | | |

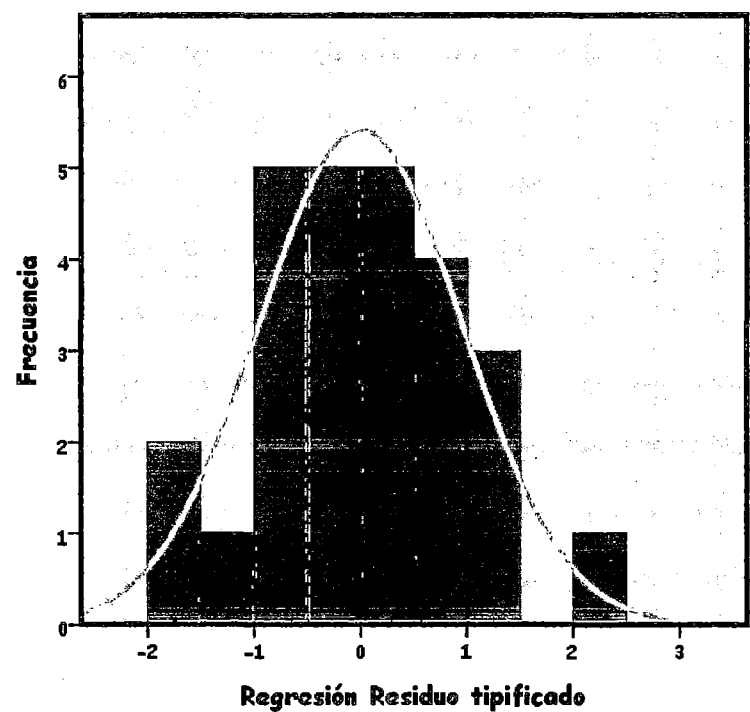
Fuente: Elaboración Propia

TABLA 4.12 Prueba de Kolmogorov – Smirnov en el Lado B

| | | Standardized Residual |
|---|-------------------|-----------------------|
| N | | 27 |
| Parámetros normales ^{a,b} | Media | ,0000000 |
| | Desviación típica | ,96076892 |
| Diferencias más extremas | Absoluta | ,107 |
| | Positiva | ,107 |
| | Negativa | -,046 |
| Z de Kolmogorov-Smirnov | | ,554 |
| Sig. asintót. (bilateral) | | ,919 |
| a. La distribución de contraste es la Normal. | | |
| b. Se han calculado a partir de los datos. | | |

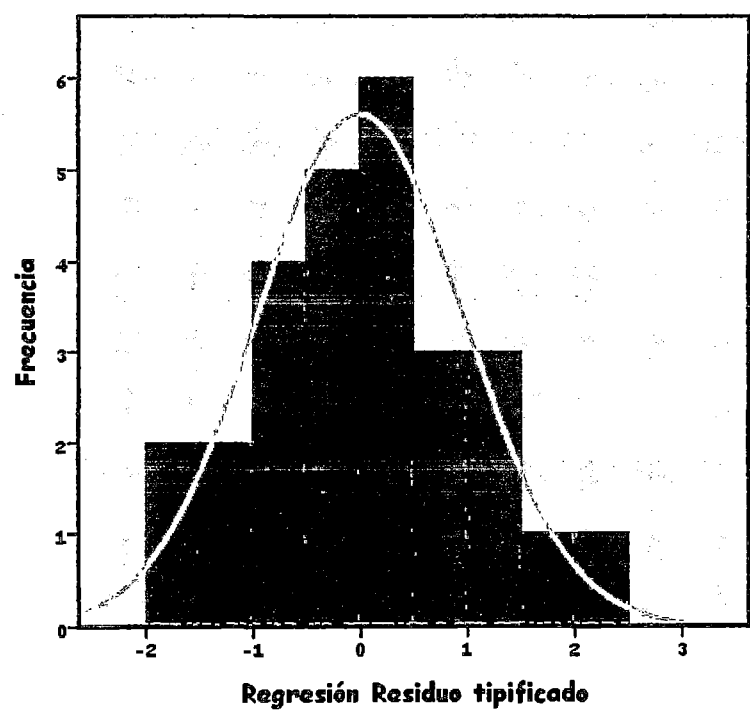
Fuente: Elaboración Propia

GRÁFICO N° 4.5.- Histograma de residuos tipificados - Lado A



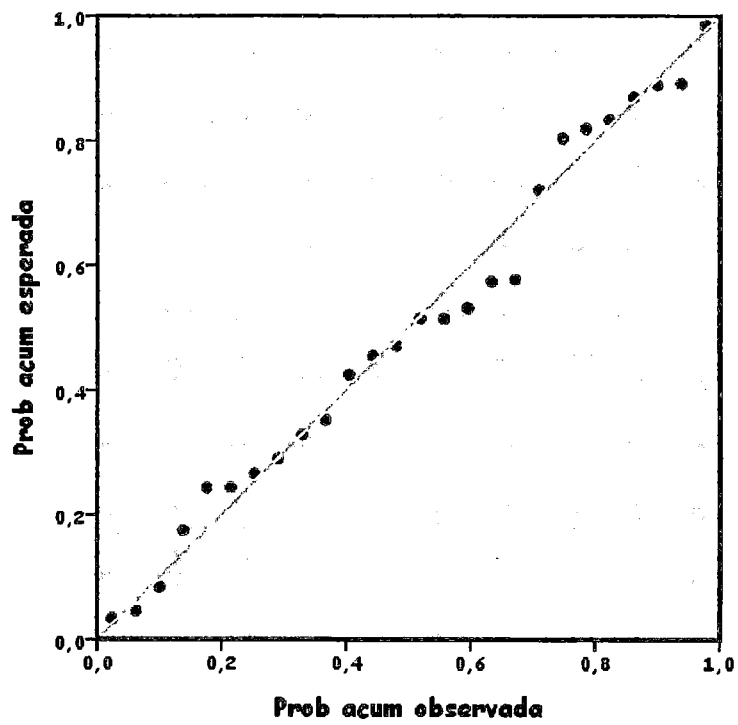
Fuente: Elaboración propia

GRÁFICO N° 4.6.- Histograma de residuos tipificados - Lado B



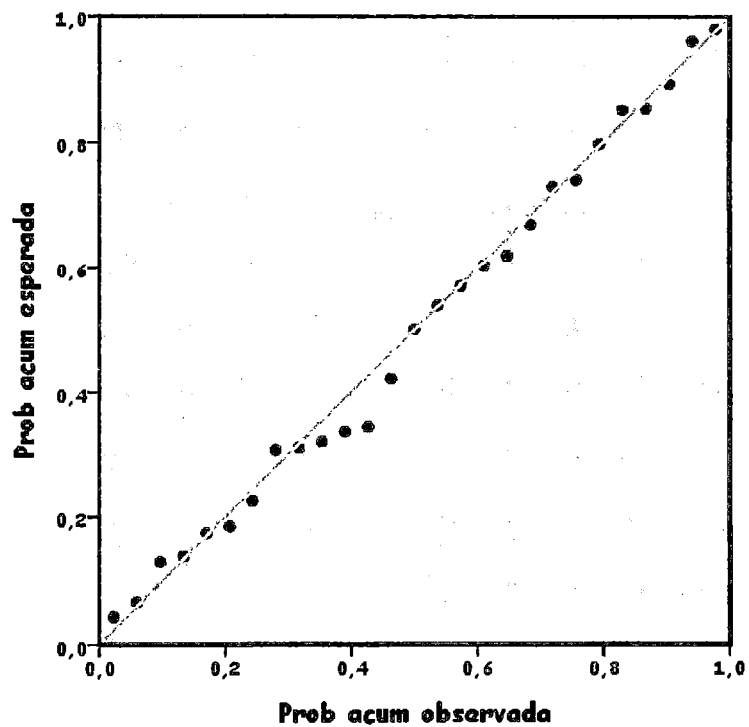
Fuente: Elaboración propia

GRÁFICO N° 4.7.- P-P normal de regresión Residuos tipificados - Lado A



Fuente: Elaboración propia

GRÁFICO N° 4.8.- P-P normal de regresión Residuos tipificados - Lado B



Fuente: Elaboración propia

Por su parte el estadístico de Durbin Watson proporciona información sobre el grado de independencia de los residuos, el estadístico DW toma valor de 2 cuando los residuos son independientes (entre 1.5 y 2.5 se considera que existe independencia), $DW < 2$ indica autocorrelación positiva y $DW > 2$ autocorrelación negativa.

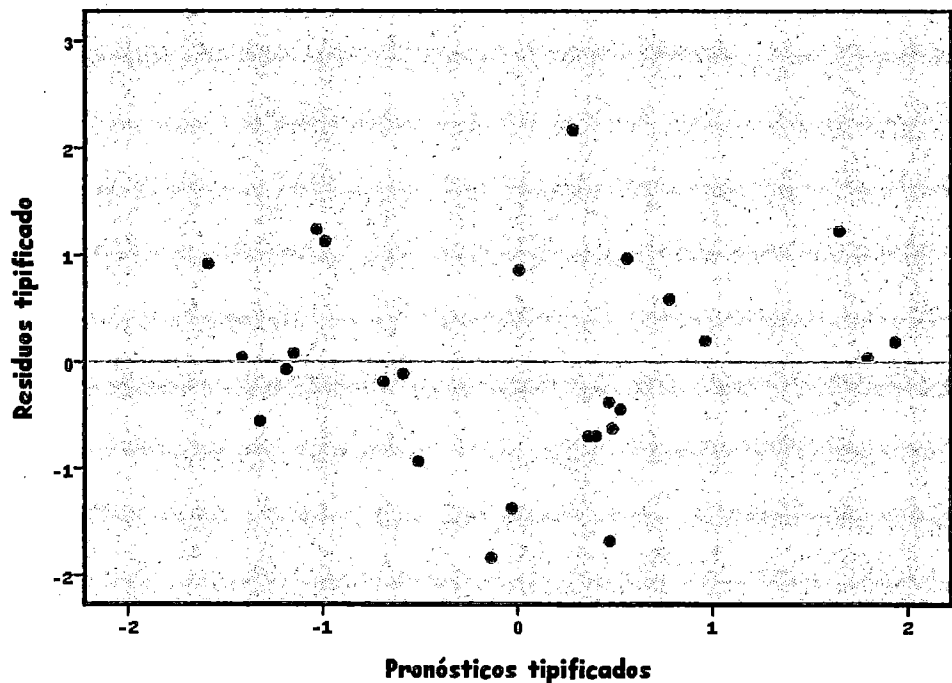
Para el modelo de regresión lineal múltiple en el **Lado A**, el valor del dato DW arroja 1.950 (**Tabla 4.3**) y para el **Lado B**, el valor del dato DW arroja 1.725 (**Tabla 4.4**), en ambos lados se obtiene valores menores que 2, lo que nos indica que la autocorrelación es positiva y que los residuos son independientes. Se dice que un modelo predictivo presenta homocedasticidad o igualdad de varianza cuando la variación de los residuos es uniforme en todo el rango de valores pronosticados. Para saber si la varianza de los residuos es constante, hemos dividido en dos partes los residuos, con la mitad de ellos calculamos la varianza, igual procedemos a calcular la varianza con la otra mitad; dividimos la varianza grande entre la varianza pequeña, si el resultado es menor que cuatro nos indica que la varianza es constante, al dividir las varianzas de los residuos del **Lado A** se obtiene un valor de 1.35 y en el **Lado B** se obtiene un valor de 1.94, en ambos lados, A y B, los valores obtenidos son menores que cuatro lo que nos demuestra que la variación de los residuos es constante.

Observando los diagramas de dispersión, que se muestran en la **Figura 4.9 (Lado A)** y en la **Figura 4.10 (Lado B)**, podemos ver que la variabilidad de los residuos y los pronósticos son independientes, pues la nube de puntos no sigue ninguna pauta de asociación clara, ni lineal ni de otro tipo.

El modelo de regresión múltiple debe cumplir el supuesto de linealidad para ello realizamos diagramas de dispersión parcial lo que nos va permitir examinar la relación existente entre la variable dependiente y cada una de las variables independientes por separado, tras eliminar de ellas el efecto del resto de las variables independientes incluidas en el análisis.

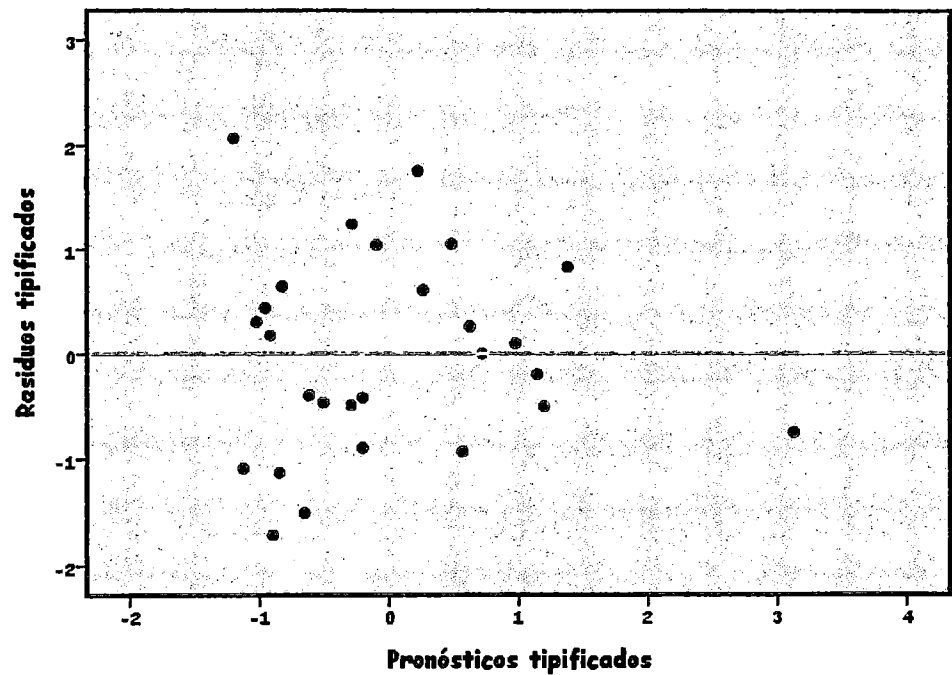
En la **Figura 4.11 y Figura 4.12**, que corresponden al **Lado A**, y la **Figura 4.13 y Figura 4.14**, que corresponden al **Lado B**, nos muestran los diagramas parciales entre las variables independientes con la variable dependiente, y así observamos la relación neta entre dichas variables.

GRÁFICO N° 4.9.- Diagrama de dispersión de pronósticos tipificados por residuos tipificados en el Lado A



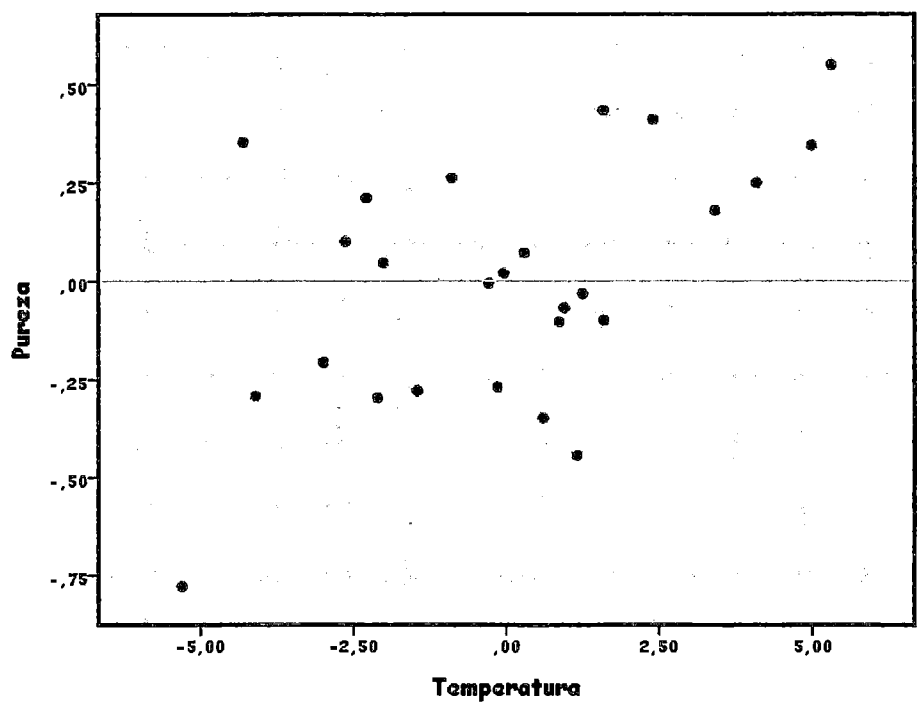
Fuente: Elaboración propia

GRÁFICO N° 4.10.- Diagrama de dispersión de pronósticos tipificados por residuos tipificados en el Lado B



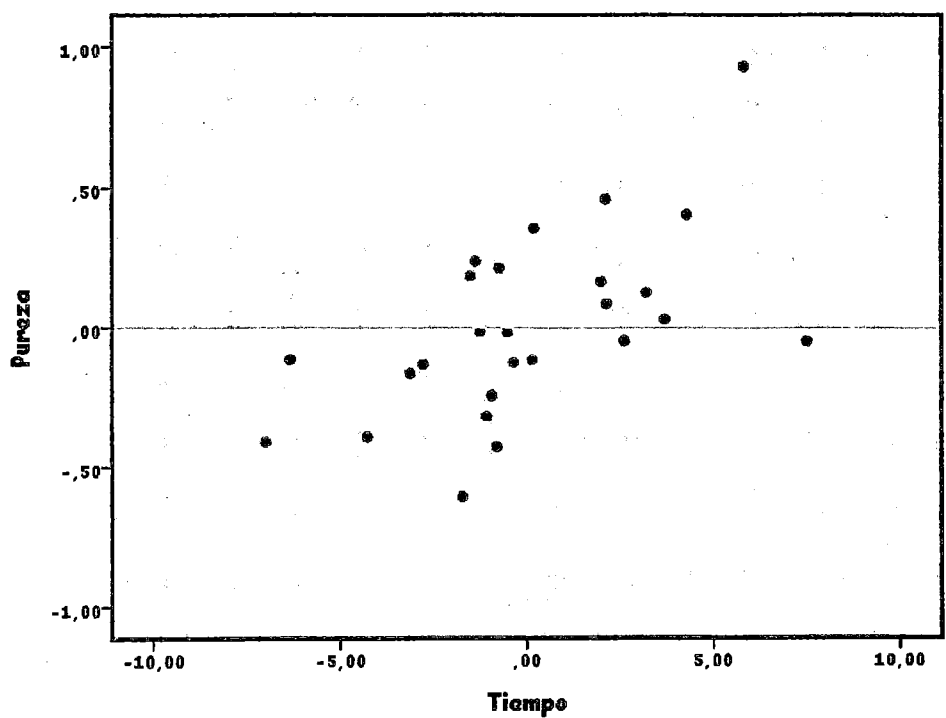
Fuente: Elaboración propia

GRÁFICO N° 4.11.- Regresión parcial Pureza vs Temperatura en el Lado A



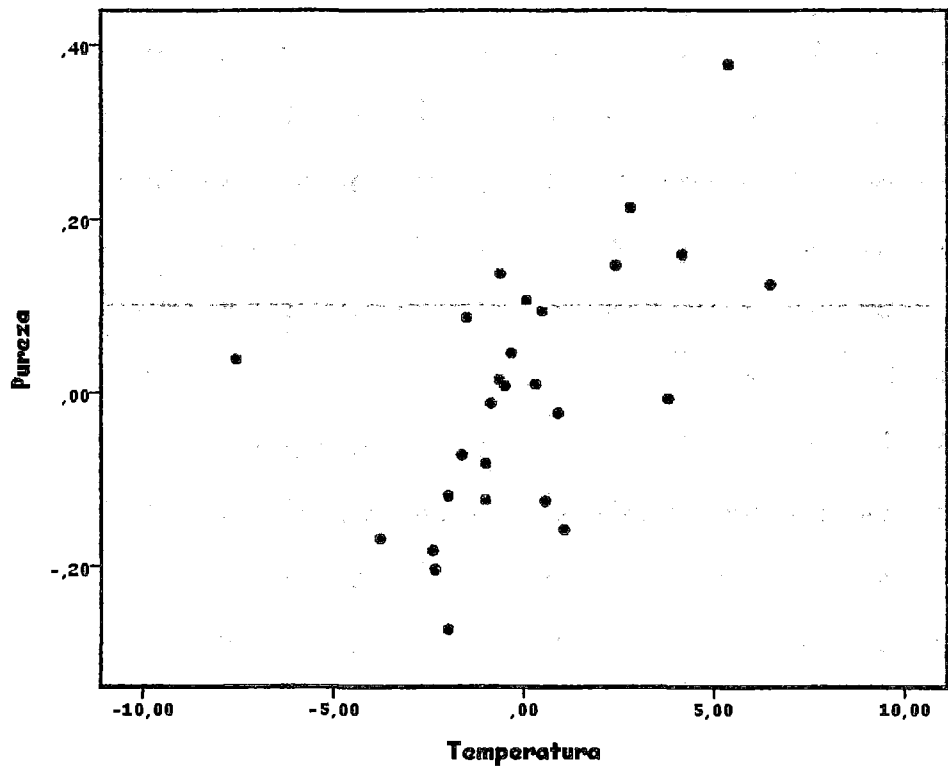
Fuente: Elaboración propia

GRÁFICO N° 4.12.- Regresión parcial Pureza vs Tiempo en el Lado A



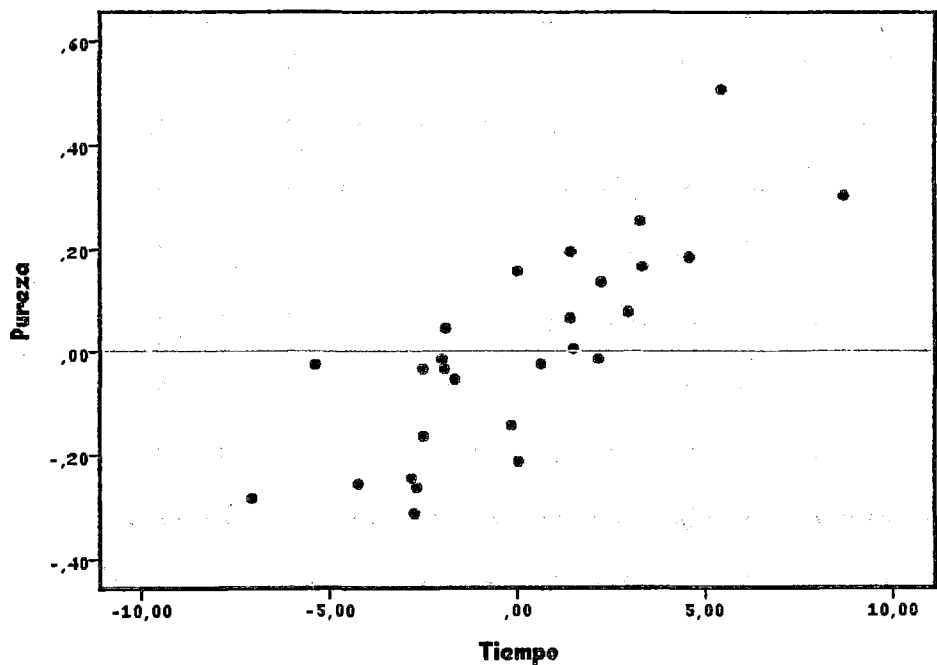
Fuente: Elaboración propia

GRÁFICO N° 4.13.- Regresión parcial Pureza vs Temperatura en el Lado B



Fuente: Elaboración propia

GRÁFICO N° 4.14.- Regresión parcial Pureza vs Tiempo en el Lado B



Fuente: Elaboración propia

Otro de los supuestos que debe realizar para el análisis de los residuos, es la no colinealidad, hablamos de colinealidad cuando entre las variables independientes de una ecuación existen correlaciones altas.

Podemos observar en la **Tabla 4.13** que entre las variables independientes, Δ temperatura y Δ tiempo, el coeficiente de correlación R 0.737 y el coeficiente de determinación R^2 0.543, con respecto al **Lado A** y en la **Tabla 4.14**, el coeficiente de correlación R 0.742 y el coeficiente de determinación R^2 0.551, con respecto al **Lado B**.

En ambos lados A y B los valores entre las variables independientes son mayores que 0.05 lo que nos podría indicar que hay una relación lineal entre dichas variables, pero para determinar si hay existencia o no de colinealidad la dificultad estriba precisamente en determinar cuál es el grado máximo de relación permisible entre las variables independientes, es por ello que es necesario obtener algunos estadísticos que nos puedan ayudar a diagnosticar la presencia de colinealidad.

El nivel de tolerancia de una variable se obtiene restando al coeficiente de determinación (R^2) que resulta de regresar esa variable sobre el resto de variables independientes, valores muy pequeños indican que existe colinealidad. En la **Tabla 4.7** el valor de la tolerancia es 0.457 con respecto a los datos del **Lado A** y en la **Tabla 4.8** es 0.449 con respecto a los datos del **Lado B**.

Los factores de inflación de la varianza, son los inversos de los niveles de tolerancia, como regla general nos debería preocupar los valores de FIV mayores de 10, cuanto mayor es el valor nos indica presencia de colinealidad. En la **Tabla 4.7** el valor de FIV es 2.188 con respecto a los datos del **Lado A** y en la **Tabla 4.8** es 2.226 con respecto a los datos del **Lado B**, en ambos lados los valores son menores de 10.

Los autovalores informan sobre cuantas dimensiones o factores diferentes subyacen en el conjunto de variables independientes utilizadas. La presencia de autovalores próximos a cero indica que las variables independientes están muy relacionadas entre sí (colinelidad), podemos verificar que en la **Tabla 4.15** los valores son 2.949; 0.046 y 0.005 con respecto a los datos del **Lado A** y en la **Tabla 4.16** es 2.947; 0.046 y 0.007 con respecto a los datos del **Lado B**.

Los índices de condición son la raíz cuadrada del cociente entre el autovalor más grande y cada uno del resto de los autovalores, estos valores no deben superar de 15, índices mayores de 15 indican posible existencia de colinealidad, y si los Índices superan valores 30 delatan un problema serio de colinealidad.

En la **Tabla 4.15** los índices son 1.000; 8.007 y 23.669 con respecto a los datos del **Lado A** y en la **Tabla 4.16** es 1.000; 7.999 y 20.818 con respecto a los datos del **Lado B**, algunos datos son mayores que 15 lo que nos indica una posible existencia de colinealidad.

Al realizar el diagnóstico de colinealidad a partir de los estadísticos: Niveles de tolerancia, FIV, autovalores e índices de condición, llegamos a la conclusión que tanto en el **Lado A** y **B**, las variables independientes están ligeramente relacionadas, esto nos indica que existe una colinealidad moderada entre ellas

TABLA 4.13.- Correlación entre las variables estudiadas en el Lado A

| | | Pureza | Temperatura | Tiempo |
|------------------------|-------------|--------|-------------|--------|
| Correlación de Pearson | Pureza | 1,000 | ,807 | ,826 |
| | Temperatura | ,807 | 1,000 | ,737 |
| | Tiempo | ,826 | ,737 | 1,000 |
| Sig. (unilateral) | Pureza | . | ,000 | ,000 |
| | Temperatura | ,000 | . | ,000 |
| | Tiempo | ,000 | ,000 | . |
| N | Pureza | 26 | 26 | 26 |
| | Temperatura | 26 | 26 | 26 |
| | Tiempo | 26 | 26 | 26 |

Fuente: Elaboración Propia

TABLA 4.14.- Correlación entre las variables estudiadas en el Lado B

| | | Pureza | Temperatura | Tiempo |
|------------------------|-------------|--------|-------------|--------|
| Correlación de Pearson | Pureza | 1,000 | ,834 | ,915 |
| | Temperatura | ,834 | 1,000 | ,742 |
| | Tiempo | ,915 | ,742 | 1,000 |
| Sig. (unilateral) | Pureza | . | ,000 | ,000 |
| | Temperatura | ,000 | . | ,000 |
| | Tiempo | ,000 | ,000 | . |
| N | Pureza | 27 | 27 | 27 |
| | Temperatura | 27 | 27 | 27 |
| | Tiempo | 27 | 27 | 27 |

Fuente: Elaboración Propia

TABLA 4.15.- Diagnóstico de Colinealidad en el Lado A

| Modelo | Dimensión | Autovalores | Índice de condición | Proporciones de la varianza | | |
|---------------------------------|-----------|-------------|---------------------|-----------------------------|-------------|--------|
| | | | | (Constante) | Temperatura | Tiempo |
| 1 | 1 | 2,949 | 1,000 | ,00 | ,00 | ,01 |
| | 2 | ,046 | 8,007 | ,12 | ,01 | ,52 |
| | 3 | ,005 | 23,669 | ,88 | ,99 | ,47 |
| a. Variable dependiente: Pureza | | | | | | |

Fuente: Elaboración Propia

TABLA 4.16.- Diagnóstico de Colinealidad en el Lado B

| Modelo | Dimensión | Autovalores | Índice de condición | Proporciones de la varianza | | |
|---------------------------------|-----------|-------------|---------------------|-----------------------------|-------------|--------|
| | | | | (Constante) | Temperatura | Tiempo |
| 1 | 1 | 2,947 | 1,000 | ,00 | ,00 | ,00 |
| | 2 | ,046 | 7,999 | ,18 | ,00 | ,50 |
| | 3 | ,007 | 20,818 | ,82 | ,99 | ,49 |
| a. Variable dependiente: Pureza | | | | | | |

Fuente: Elaboración Propia

TABLA 4.17.- Comparación entre Modelo de regresión simple Temperatura vs Pureza y Modelo de regresión múltiple Temperatura, Tiempo vs Pureza del Lado A

| Modelo | R | R cuadrado | R cuadrado corregida | Error típ. de la estimación | Durbin-Watson |
|--------|-------------------|------------|----------------------|-----------------------------|---------------|
| 1 | ,807 ^a | ,651 | ,637 | ,33438 | |
| 2 | ,877 ^b | ,768 | ,748 | ,27841 | 1,950 |

a. Variables predictoras: (Constante), Temperatura
b. Variables predictoras: (Constante), Temperatura, Tiempo
c. Variable dependiente: Pureza

Fuente: Elaboración Propia

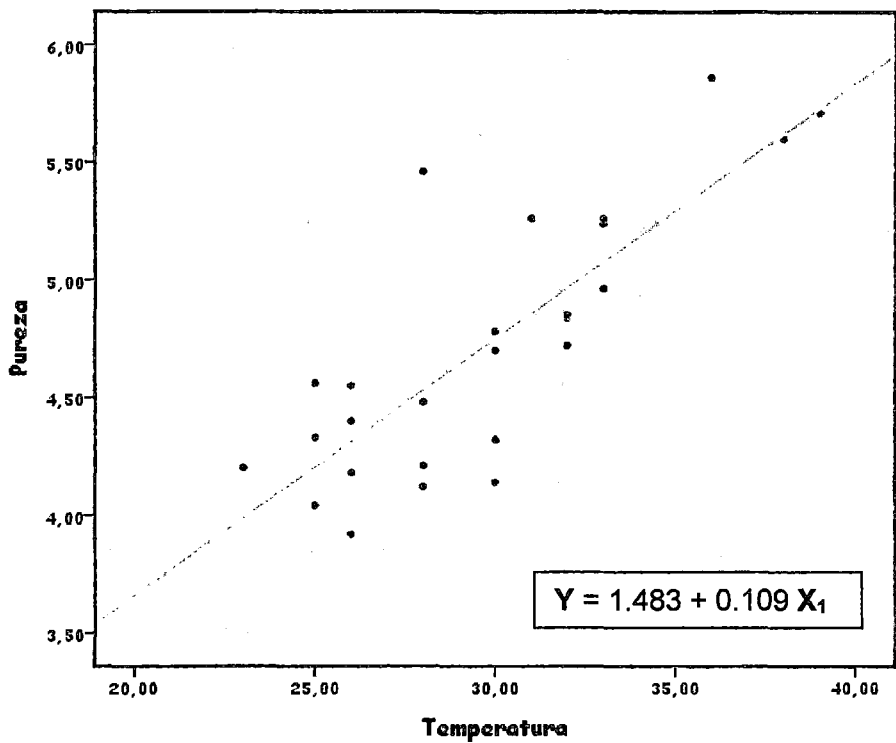
TABLA 4.18.- Comparación entre Modelo de regresión simple Tiempo vs Pureza y Modelo de regresión múltiple Temperatura, Tiempo vs Pureza del Lado A

| Modelo | R | R cuadrado | R cuadrado corregida | Error típ. de la estimación | Durbin-Watson |
|--------|-------------------|------------|----------------------|-----------------------------|---------------|
| 1 | ,826 ^a | ,682 | ,669 | ,31923 | |
| 2 | ,877 ^b | ,768 | ,748 | ,27841 | 1,950 |

a. Variables predictoras: (Constante), Tiempo
b. Variables predictoras: (Constante), Tiempo, Temperatura
c. Variable dependiente: Pureza

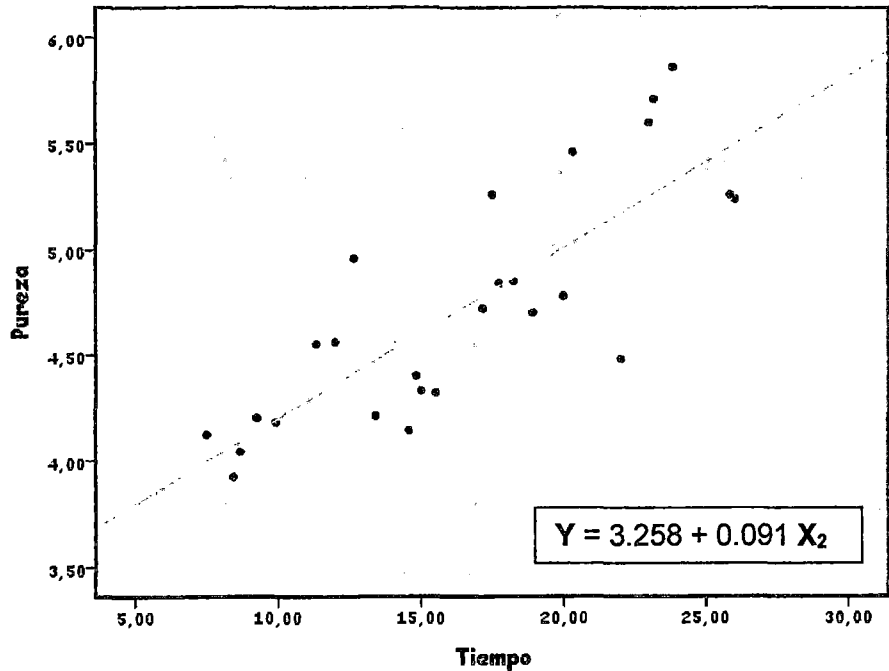
Fuente: Elaboración Propia

GRÁFICO N° 4.15.- Pureza Vs Temperatura de cristalización en el Lado A



Fuente: Elaboración propia

GRÁFICO N° 4.16.- Pureza Vs Tiempo de cristalización en el Lado A



Fuente: Elaboración propia

TABLA 4.19.- Comparación entre Modelo de regresión simple Temperatura vs Pureza y Modelo de regresión múltiple Temperatura, Tiempo vs Pureza del Lado B

| Modelo | R | R cuadrado | R cuadrado corregida | Error típ. de la estimación | Durbin-Watson |
|--------|-------------------|------------|----------------------|-----------------------------|---------------|
| 1 | ,834 ^a | ,696 | ,684 | ,20436 | |
| 2 | ,944 ^b | ,890 | ,881 | ,12531 | 1,725 |

a. Variables predictoras: (Constante), Temperatura
b. Variables predictoras: (Constante), Temperatura, Tiempo
c. Variable dependiente: Pureza

Fuente: Elaboración propia

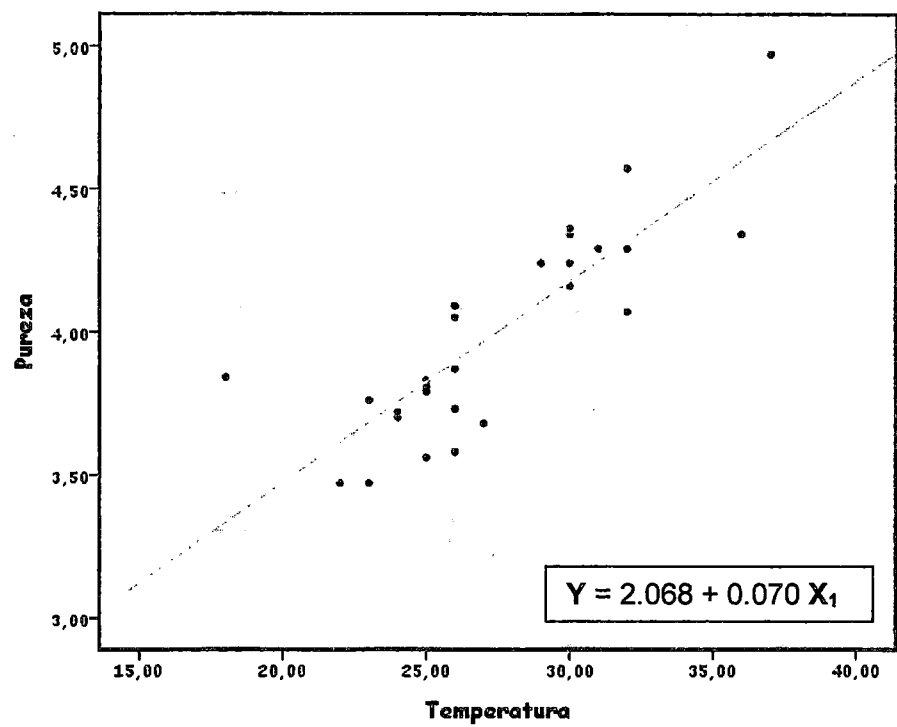
TABLA 4.20.- Comparación entre Modelo de regresión simple Tiempo vs Pureza y Modelo de regresión múltiple Temperatura, Tiempo vs Pureza del Lado B

| Modelo | R | R cuadrado | R cuadrado corregida | Error típ. de la estimación | Durbin-Watson |
|--------|-------------------|------------|----------------------|-----------------------------|---------------|
| 1 | ,915 ^a | ,836 | ,830 | ,14993 | |
| 2 | ,944 ^b | ,890 | ,881 | ,12531 | 1,725 |

a. Variables predictoras: (Constante), Tiempo
b. Variables predictoras: (Constante), Tiempo, Temperatura
c. Variable dependiente: Pureza

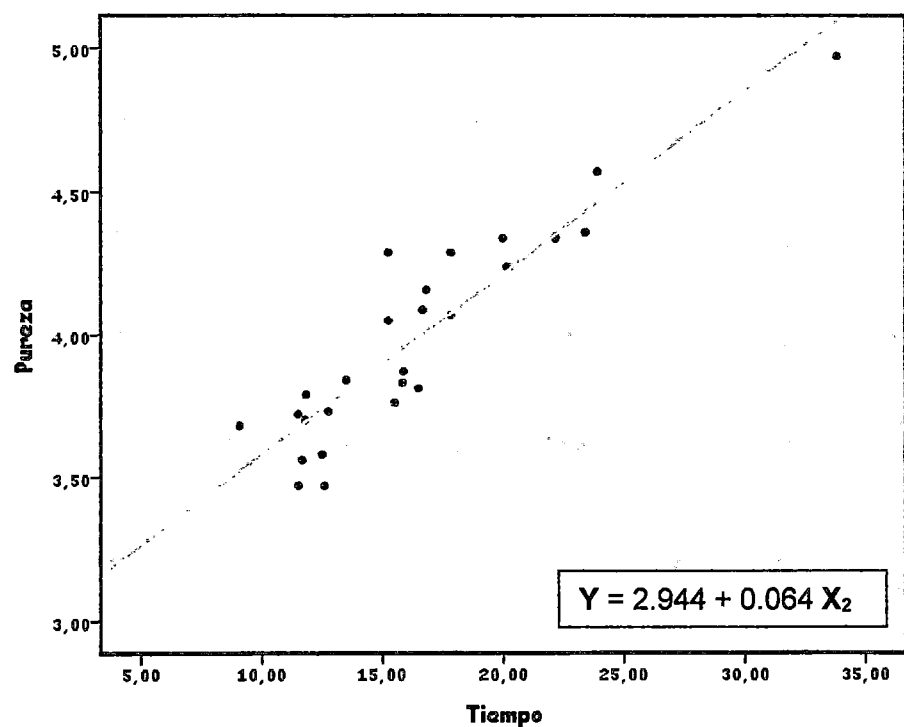
Fuente: Elaboración Propia

GRÁFICO N° 4.17.- Pureza Vs Temperatura de cristalización en el Lado B



Fuente: Elaboración propia

GRÁFICO N° 4.18.- Pureza Vs Tiempo de cristalización en el Lado B



Fuente: Elaboración propia

CAPITULO V

CONCLUSIONES

- ✓ En la empresa AGROPUCALA S.A los parámetros de operación en los cristalizadores fueron de 16.06 horas y 16.51 horas de tiempo de enfriamiento para el Lado A y Lado B respectivamente, y la temperatura de enfriamiento fue de 29.73 °C y 27.41 °C, para el Lado A y Lado B respectivamente.
- ✓ Se determinaron dos puntos de muestreo uno en la descarga de masa cocida C de los tachos de tercera y el otro punto de muestreo es el último cristizador de la batería del lado A y lado B, esto nos permitió tener un criterio adecuado para evaluar los parámetros de operación en el proceso de cristalización; se pudo elegir más puntos de muestreo para controlar dichas variables, pero no se contó con las herramientas adecuadas ni el personal necesario.
- ✓ Se evaluaron los datos aplicando la estadística descriptiva y utilizando el software SPSS Statistics 22 para los datos experimentales; realizando un análisis de regresión lineal múltiple paso a paso, lo que nos permite explicar el grado de asociación o efecto que ejercen las variables independientes sobre la dependiente, en este caso los coeficientes de correlación múltiple R^2 son 87.7% y 94.4 %, para el Lado A y Lado B respectivamente, lo que nos permite comprobar que las variables independientes definidas como: temperatura y tiempo de cristalización son significativas para la variable dependiente caída de pureza, además hemos obtenido una ecuación lineal múltiple con las tres variables estudiadas, de la cual podemos predecir el comportamiento de las mismas.
- ✓ De los datos experimentales se obtuvo que la mayor caída de pureza para el Lado A es de 5.86 puntos, se trabajó a una temperatura de enfriamiento de 36°C y un tiempo cristalización de 23.83 horas, y para el Lado B la mayor caída de pureza es de 4.97 puntos, se trabajó a una temperatura de cristalización 37°C y un tiempo de cristalización de 33.83 horas.

CAPITULO VI

RECOMENDACIONES

- ✓ Analizar otras variables que influyen en la caída de pureza de miel tercera como son la sobresaturación, viscosidad, rendimiento de cristales, tamaño del cristal, uniformidad de los cristales, impurezas, velocidad de enfriamiento, temperatura de calentamiento y velocidad de agitación.
- ✓ Se debe realizar una adecuada política de enfriamiento, para poder obtener masas cocidas C con un mayor agotamiento y así contrarrestar las pérdidas de azúcar en la miel de tercera.
- ✓ Se debe realizar un estudio de la lubricación de la templa para establecer la forma y dosis en que se debe realizar y así poder maximizar el agotamiento en los cristalizadores, ya que no se encuentra estandarizada.
- ✓ Realizar un análisis estadístico adecuado, considerando la importancia de las variables antes mencionadas, ya que esto ayudara a realizar un buen estudio de la interrelación de las variables que intervienen en el agotamiento de masa cocida C.
- ✓ Realizar un muestreo de la templa de masa cocida C no solamente al inicio y al final de proceso de cristalización por enfriamiento, sino realizar la caracterización de la masa cocida en un tiempo determinado en toda la batería de los cristalizadores.

CAPITULO VII

REFERENCIA

BIBLIOGRÁFICA

7.1 BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar, N. & Román, G. (2006). Aspectos teóricos y aplicaciones de la operación unitaria de Cristalización. *Revista Ingeniería*, 16(1), pp. 123-133.
- Aguilar Rivera, N. (2010). Perfil Competitivo de la Agroindustria Azucarera de Caña de Azúcar (*Saccharum Officinarum*). *Revista Virtual Pro*, pp.1-3.
- Alvarado, A., Báez, O., Ortiz, F., Tobón, L. & Torres, R. (2008). Disminución de pérdidas sacarosa en la elaboración de meladura en un ingenio azucarero. *Revista de la Ingeniería Industrial*. 2(1), pp. 1-23.
- Álvarez, T., González, S. & Tadeo, F. *Seguimiento de la cristalización de azúcar mediante procesamiento de imagen con Wavelets*. Universidad de Valladolid: Valladolid.
- Araya, Y. *Como mejorar la eficiencia en la fabricación de azúcar*. Universidad de San Carlos: San Carlos.
- Asociación Naturland (2000). Agricultura Orgánica en el Trópico y Subtrópico Guías de 18 cultivos-Caña de Azúcar. *Revista Naturland*, 1(2), pp. 1.
- ACRA corporation (1983). *Haciendo Azúcar*, 6 (1), pp. 5 - 63. Miami, USA.
- Bolaños, E., Moncada, D., Quintana, P. & Salcedo, L. (2005). Evaluación del crecimiento de cristales de azúcar y determinación del factor de forma de área superficial. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*. 4(1), pp.123-129.
- Bouzas, J., Estrada, J. & Hernández, M. (Agosto, 2002). *Optimización de agotamiento de masa de "C" del Ingenio Emiliano Zapata S.A. de C.V.* En R. López (Presidencia), *Residencias Profesionales en el área de Ingeniería Química y Bioquímica*. Cuarto Seminario llevado por la Academia de Ingeniería Química y Bioquímica: Zacatapec.
- Contreras, L. & Hernández, R. (2005). *Los sistemas de masa cocida y el agotamiento de las mieles en las condiciones actuales de materia prima*. *Centro Azúcar*, 32(1), pp. 3-4.

- Da Camara Goncalves, M. (1996). *Modelizacao e simulacao de uma unidade industrial de cristalizacao de acucar*. Universidad de Porto: Porto Alegre.
- Díaz, A. (2002). *Análisis de las viscosidades de mieles y masas*. *Tecnología Química*, 22(2), pp. 51.
- Díaz, L. & Portocarrero, E. (2002). *Manual de Producción de Caña de Azúcar (Saccharum officinarum L.)*. Universidad Zamorano: Honduras.
- Díaz, S., Martín, K. & Pérez, P. (2003). Importancia de la conservación de los azúcares reductores en la capacidad de agotamiento. *Revista Avanzada Científica*. 6(2), pp. 1-7.
- Díaz, T. & Domínguez, F. (2003). *Agotamiento de mieles en la industria azucarera*. Universidad de Matanzas: Matanzas.
- Díaz, T. & Domínguez, F. (2004). *Caracterización industrial del proceso de cristalización de azúcar por enfriamiento*. Universidad de Matanzas: Matanzas.
- Domínguez, F. J. (2007). Política de enfriamiento óptima en cristalizadores de azúcar. *I Taller Internacional de Ingenierías Mecánicas, Energética y Química*. Universidad de Matanzas: Matanzas.
- Domínguez, G. (2013). *Normalización del tamaño de cristal de azúcar en el proceso azucarero a través del desarrollo sustentable aplicado al balance energético*. Instituto Politécnico Nacional: Altamira.
- Fajardo Castillo, E.; Sarmiento Forero, S. (Agosto, 2007). *Evaluación de melaza de caña como sustrato para la producción de Saccharomyces Cerevisiae*. Pontificia Universidad Javeriana: Bogotá.
- Flores, J. (2008). *Manual de Control de Procesos*. Diagramas de flujo de procesos. Ingenio Central Izalco: Sonsonate.
- Honig, P. (1953). *Principios de tecnología azucarera*, pp. 265 - 300. tomo II. New York: Continental.
- Hugot, E. (1986). *Ingeniería de la caña de azúcar*, pp. 493 - 500. Brisbane: Elsevier.
- Larrahondo, J. (1995). *Calidad de la caña de azúcar*. Centro de Investigación de la caña de azúcar de Colombia (CENICAÑA), pp. 340. Cali.

- Méndez, O. & Riera, G. (2010). Cocidas Modelos matemáticos para la determinación de la viscosidad en mieles finales y masas C. *Tecnología Química*. 30(3), pp. 48-52.
- Paredes, K. (2011). *Efecto del pH sobre las pérdidas de sacarosa en la etapa de clarificación de la Empresa Agroindustrial Tumán S.A.A.* Universidad Nacional Pedro Ruíz Gallo: Lambayeque.
- Ramírez, N. (2000). *Evaluación de los cambios fisicoquímicos en la composición de la melaza almacenada con respecto del tiempo.* Universidad de San Carlos de Guatemala: Guatemala.
- Rein, P. (2007). *Ingeniería de la caña de azúcar*, pp. 409 - 424. Berlín: The B&A Group.
- Viada, F. (2010). *Metodología para obtener y certificar modelos estadísticos del proceso de cristalización del azúcar.* *Revista Virtual Pro*. 106(1), pp. 1-22. Recuperado de : <http://www.revistavirtualpro.com/descarga/metodologia-para-obtener-y-certificar-modelos-estadisticos-del-proceso-de-cristalizacion-del-azucar>
- Villa, M. (2008). *Efectos de microbicidas y antagonistas microbianos sobre microorganismo causales del deterioro post cosecha de caña y su impacto de pérdidas en la sacarosa en el ingenio.* Instituto Politécnico: Tlaxcala.
- Zepeda, E. (2012). *Propuestas de alternativas para la reducción de pérdidas de sacarosa en un ingenio azucarero.* Universidad de El Salvador: San Salvador.

7.2 LINKOGRAFÍA

- I. http://www.agropucala.com/website/res/detResolucion.php?tipodoc_id=33
- II. <http://w4.siap.gob.mx/sispro/Integra/Caracteristicas/CanaAzu.html>
- III. <http://w4.siap.gob.mx/sispro/Integra/Caracteristicas/CanaAzu.html>

CAPITULO VIII

APENDICE

GLOSARIO

- **Agotamiento:** Propiedad que tienen las mieles de un sistema de tres masas cocidas, que implica la posibilidad de recuperar la mayor cantidad de azúcar posible a partir de ellas.
- **Azúcar:** Cuerpo sólido cristalizado, perteneciente al grupo químico de los hidratos de carbono, de color blanco en estado puro, soluble en el agua y en el alcohol y de sabor muy dulce. Se obtiene de la caña dulce, de la remolacha y de otros vegetales.
- **Azúcares Reductores:** Se llaman azúcares reductores a todos los monosacáridos que se encuentran disueltos en el jugo de caña. Se calcula como azúcar invertido. La glucosa es un ejemplo típico de azúcar reductor. Tiene la propiedad de desviar la luz polarizada hacia la izquierda.
- **Ceniza:** Constituyentes totales de los productos inorgánicos solubles, en los distintos productos desde la caña hasta las mieles finales y el azúcar.
- **Falso grano:** Cristal de azúcar que no posee el tamaño requerido para ser retenido por las mallas de las centrífugas. Se produce espontáneamente por la operación del tacho en la zona lábil de sobresaturación.
- **Granular:** Expresión para el proceso de cristalización en que el azúcar se transforma de un estado de solución a cristales de azúcar o grano.
- **Licor madre:** Se llama así a la miel que es extraída en las centrífugas, por la acción de la fuerza centrífuga que allí se ejerce y luego pasa a los tachos como alimentación para la formación de una nueva masa cocida.
- **Magma o Liga:** Es la mezcla de azúcar purgado de tercera con miel, o con jarabe, que se emplea para coger los pies en los tachos, se denomina también semilla de purga.

- **Masas cocidas:** Son mezclas de cristales de granos o cristales de azúcar con jarabes o miles obtenidas en los tachos al vacío, por concentración de los mismos. También se les conoce con el nombre de templás, las denominaciones son las siguientes:
 - Masa cocida primera
 - Masa cocida segunda
 - Masa cocida tercera
- **Materia extraña:** Son hojas, cogollos, tallos muertos, tierra, etc. traídos con la caña limpia.
- **Melaza:** Es el subproducto obtenido de la centrifugación de las masas de tercera. Se usa como materia prima para la industria de derivados: alcohol, ajinomoto, levaduras, alimentos balanceados, etc:
- **Miel:** Licor madre, separado por centrifugación de la masa cocida, puede ser miel "A" o de primera "B" o de segunda y final o de tercera dependiendo de la masa cocida de la cual proviene.
- **Pie de Templo:** Semilla de purga o magma que se coge (jala) en los tachos a cierta altura para elaborar una masa cocida o templo. También se denomina así el pie que se coge en el tacho con semilla de cristalización para cocinar una templo de agotamiento.
- **Pol:** Es la sacarosa contenida en una disolución expresada en % en peso, determinado analíticamente con un polarímetro y sacarímetro. En disoluciones puras el % Pol equivale exactamente al % de sacarosa, mientras que en otras impuras como el jugo de caña y las mieles, que contiene otras sustancias ópticamente activa, existe una diferencia real entre estos dos valores, diferencia que será mayor, cuanto más impura sea la disolución. Por esta razón el valor de pol es aceptado internacionalmente como sacarosa aparente.

- **Pureza:** Es la cantidad de sacarosa contenida en 100 partes de sólidos totales, expresadas en por ciento. En la práctica, la pureza aparente se calcula con los datos de pol y brix.
- **Sacarosa:** La sacarosa es un disacárido compuesto por una molécula de glucosa (dextrosa) y una de fructosa (levulosa); está conformada por 12 átomos de carbono, 22 átomos de hidrógeno y 11 de oxígeno, con fórmula condensada $C_{12}H_{22}O_{11}$ (oxígeno 51,42%, carbono 42,10%, hidrógeno 6,48%). Con un peso molecular de 342.30, es un sólido cristalino que carameliza a 160°C, y es un azúcar no reductor y poli-alcohol que tiene 3 grupo hidroxilos primarios (-CH₂OH 6,1' y 6'') y 5 en posición secundaria (-CH-OH, 2, 3, 3', 4 y 4').
- **Semilla:** Hay que distinguir tres clases de semilla; la semilla de purga o magma para los pies de templa de primera y segunda; la semilla de cristalización para los pies de templa de tercera y la semilla de choque o jalea, que es un azúcar pulverizado que se introduce en el tacho para impulsar la cristalización.
- **Sobresaturación:** Formación de nuevos cristales que son producidos por nueva saturación de la miel o jarabe que queda.
- **Rendimiento:** Relación matemática que determina cuantas libras de azúcar se obtienen por cada tonelada de caña quemada y cortada. En el ingenio se determina al pesar los quintales de azúcar producida, transformándola a libras al multiplicar por cien y dividir este resultado entre las toneladas de caña ingresadas y pesadas en una báscula.
- **Tacho:** Aparato consistente en una calandria con entradas de vapor y un cuerpo que aloja a las masas cocidas formadas a partir de la meladura. Se conoce también como evaporador-cristalizador pues su función es llevar un jarabe azucarado a una mayor concentración de sólidos evaporando el agua y por sobresaturación lograr la formación de cristales de azúcar.
- **Templa:** Se conoce con este nombre a la carga completa de masa cocida dentro de un tacho.

- **Vacío:** Condición dada en la cual un recipiente cerrado, se ve sometido a un proceso de evacuación de gases y aire con el fin de disminuir su presión, esto se hace con el objeto de disminuir las temperaturas de ebullición para mezclas líquidas azucaradas.
- **Viscosidad:** Se llama así a la fuerza que tienen todos los líquidos de oponerse a fluir. Su unidad de medida son los Poises

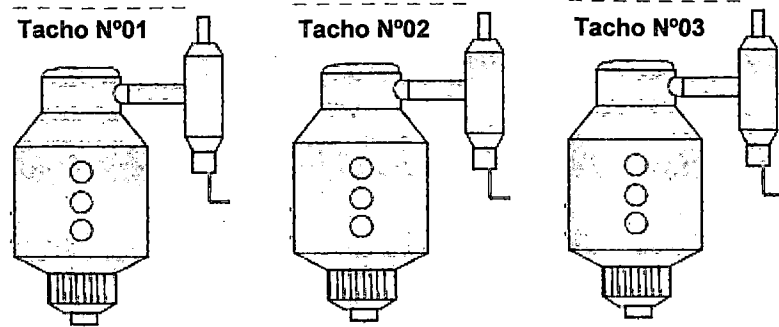
CAPITULO VIII

ANEXOS

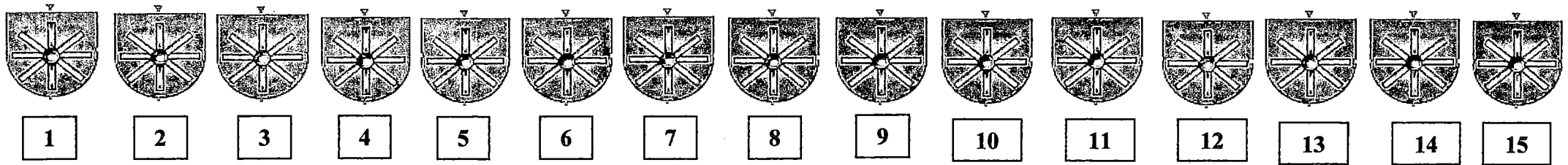
ANEXO A

CRISTALIZADOR BLANCHARD

ANEXO B
Figura N° B.1: Puntos de muestreo



Punto N°01: Descarga de los Tachos N° 01, 02 y 03



Punto N°02: Cristalizador N°01 – Lado A

Punto N°03: Cristalizador N°15 – Lado B



Cristalizador de Masa Cocida C

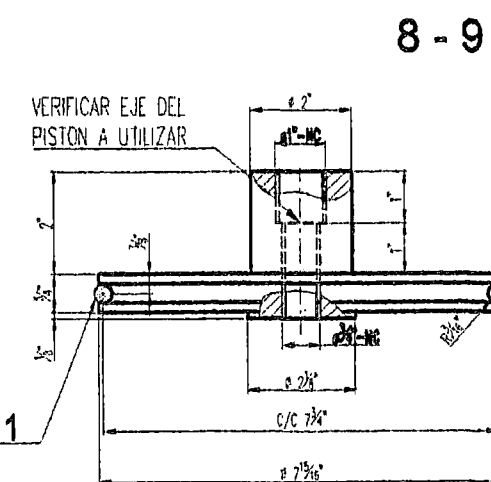
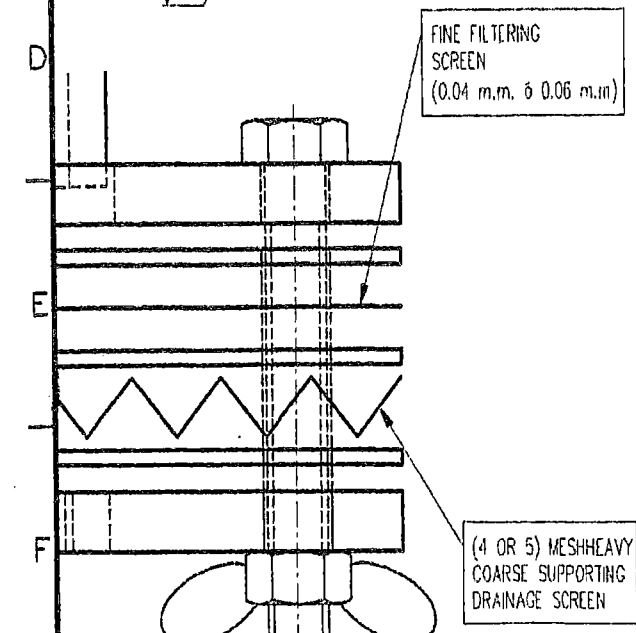
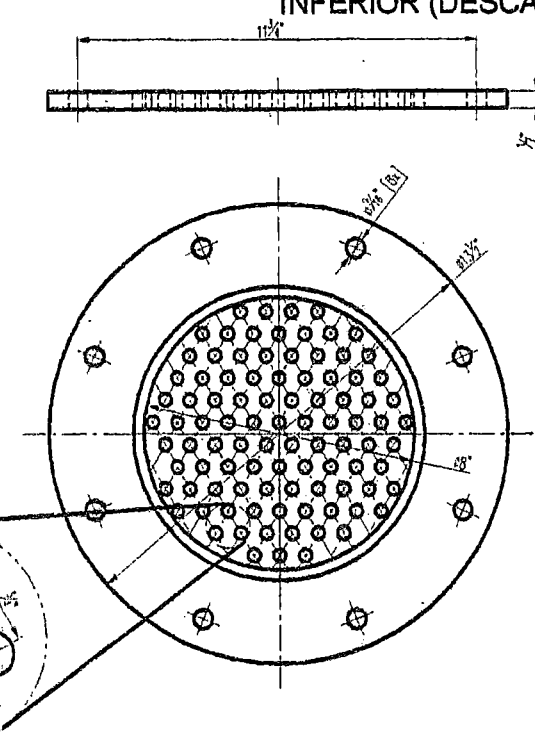
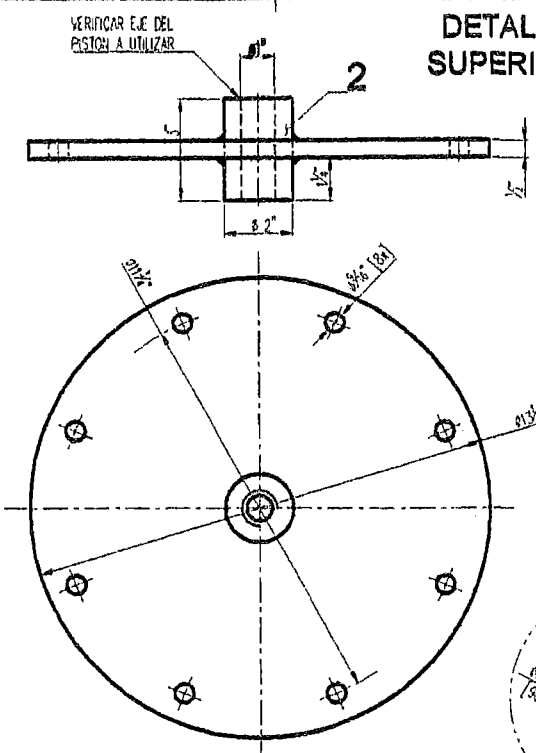
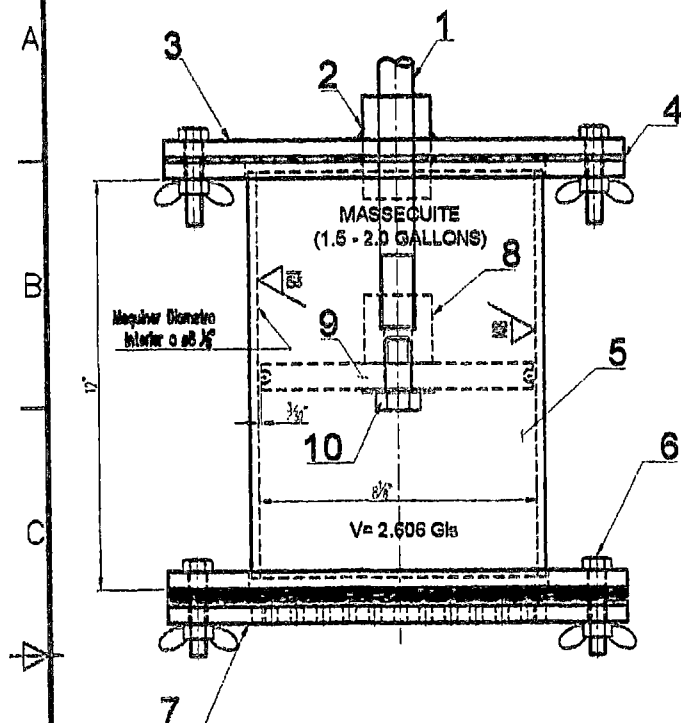
ANEXO C

FILTRO DE NUTSCH

EMSAMBLE GENERAL

DETALLE BRIDA SUPERIOR (TAPA)

DETALLE BRIDA INFERIOR (DESCARGA)

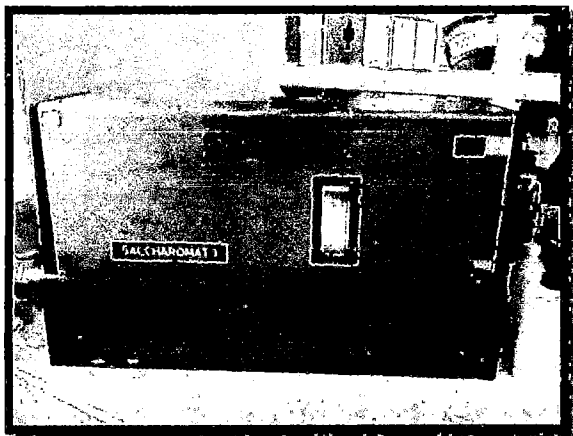


8 - 9

| 11 | 1 | Sello (Oring) | 3/8" x 24 3/8" | Debe |
|---|------|--------------------------------------|-----------------------------|-------------|
| 10 | 1 | Perno | Perno de 3/4" N-C x 5/8" | Grado 5 |
| 9 | 1 | Plancha | PL # 7 15/16" x 3/4" | ASTM A-36 |
| 8 | 1 | Niple | 1/2" Nom 2" x 2" | AISI - 1045 |
| 7 | 1 | Brida | 13 1/2" x 1/2" | ASTM A-36 |
| 6 | 16 | Pernos / Tuercas Tipo Mariposa | Pernos de 1/2" N-C x 2 1/2" | Grado 5 |
| 5 | 1 | Tubo | Tubo # Nom 8" x 12" SCH. 40 | ASTM A-53 |
| 4 | 4 | Empaquetadura | 13 1/2" x 1/8" | Debe |
| 3 | 1 | Brida | 13 1/2" x 1/2" | ASTM A-36 |
| 2 | 1 | Niple | 1/2" Nom 2" x 3" | AISI - 1045 |
| 1 | | Tubo (Longitud a determinar en obra) | 1/4" Nom 3/4" SCH. 40 | ASTM A-53 |
| PZA | CANT | DENOMINACION | DIMENSION | MATERIAL |
| <div> <div> <input type="checkbox"/> PRELIMINAR <input type="checkbox"/> DIFERENCIA </div> <div> <input type="checkbox"/> DIFERENCIA <input type="checkbox"/> DIFERENCIA </div> <div> <input checked="" type="checkbox"/> APROBADO <input type="checkbox"/> APROBADO </div> </div> <div> <p>FECHA: 25-12-13</p> <p>REVISOR: V. Sandoval</p> <p>UNID: Pulg</p> <p>Observaciones:</p> </div> <div> <p>EMPRESA AGROPUCALA S.A.A.</p> <p>CHICLAYO - PERU</p> <p>NUTSCHE - FILTRACION A PRESION DE AIRE</p> <p>EXTRACCION DE LICOR - MASA COCIDA</p> <p>Ing. William Villarreal A.</p> <p>Nº Plano: LB-1801</p> <p>Rev.: Rev.0</p> </div> <div> <p>AREA: FABRICA</p> <p>SECCION:</p> <p>UBICACION:</p> <p>HOJA: A-3</p> </div> | | | | |

ESTE DISEÑO ES PROPIEDAD INTELECTUAL DE LA EMPRESA AGROPUCALA S.A.A. CUI REPRODUCCION, DISTRIBUCION, COMERCIALIZACION O USO DE

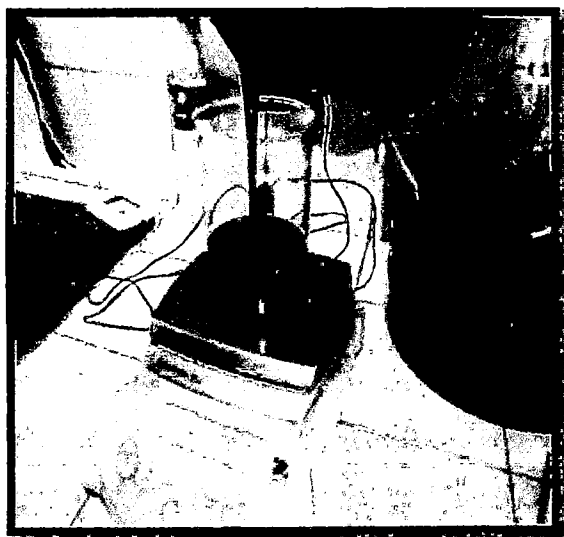
ANEXO D
EQUIPOS DE LABORATORIOS EMPLEADOS EN LOS ANÁLISIS
FISICOQUÍMICOS



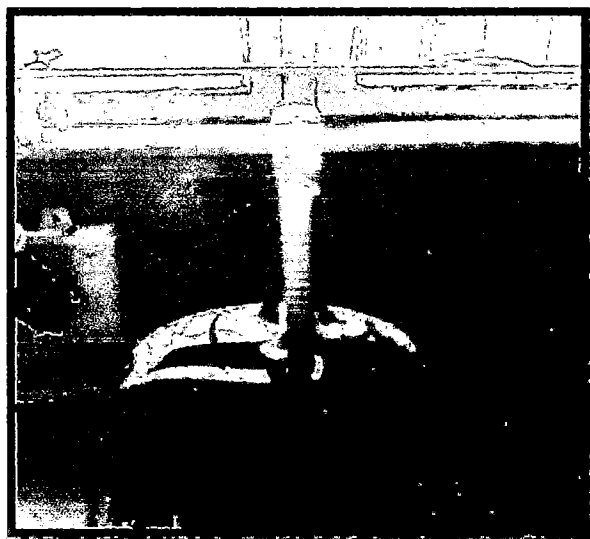
**Polarímetro para análisis de
pol en jugos y mieles**



Tubo polarimétrico



**Balanza digital para pesar
masa y mieles**



**Brixómetro para análisis de
brix de miel y masas**

ANEXO E
CORRECCIONES DE TEMPERATURA PARA LA LECTURA DE BRIX
HIDROMETRO (Calibrado a 20°C)

| Temperatura °C | Brix observado | | | | | | | | | | |
|-------------------|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| 20.5 | 0.030 | 0.030 | 0.030 | 0.030 | 0.030 | 0.030 | 0.030 | 0.030 | 0.030 | 0.030 | 0.030 |
| 21.0 | 0.060 | 0.060 | 0.060 | 0.060 | 0.060 | 0.060 | 0.060 | 0.060 | 0.060 | 0.060 | 0.060 |
| 21.5 | 0.085 | 0.086 | 0.087 | 0.088 | 0.089 | 0.090 | 0.090 | 0.090 | 0.090 | 0.090 | 0.090 |
| 22.0 | 0.110 | 0.112 | 0.114 | 0.116 | 0.118 | 0.120 | 0.120 | 0.120 | 0.120 | 0.120 | 0.120 |
| 22.5 | 0.140 | 0.141 | 0.142 | 0.143 | 0.144 | 0.145 | 0.147 | 0.149 | 0.151 | 0.153 | 0.155 |
| 23.0 | 0.170 | 0.170 | 0.170 | 0.170 | 0.170 | 0.170 | 0.174 | 0.178 | 0.182 | 0.186 | 0.190 |
| 23.5 | 0.200 | 0.201 | 0.202 | 0.203 | 0.204 | 0.205 | 0.209 | 0.213 | 0.217 | 0.221 | 0.225 |
| 24.0 | 0.230 | 0.232 | 0.234 | 0.236 | 0.238 | 0.240 | 0.244 | 0.248 | 0.252 | 0.256 | 0.260 |
| 24.5 | 0.265 | 0.267 | 0.269 | 0.271 | 0.273 | 0.275 | 0.278 | 0.281 | 0.284 | 0.287 | 0.290 |
| 25.0 | 0.300 | 0.302 | 0.304 | 0.306 | 0.308 | 0.310 | 0.312 | 0.314 | 0.316 | 0.318 | 0.320 |
| 25.5 | 0.330 | 0.332 | 0.334 | 0.336 | 0.338 | 0.340 | 0.344 | 0.348 | 0.352 | 0.356 | 0.360 |
| 26.0 | 0.360 | 0.362 | 0.364 | 0.366 | 0.368 | 0.370 | 0.376 | 0.382 | 0.388 | 0.394 | 0.400 |
| 26.5 | 0.390 | 0.393 | 0.396 | 0.399 | 0.402 | 0.405 | 0.410 | 0.415 | 0.420 | 0.425 | 0.430 |
| 27.0 | 0.420 | 0.424 | 0.428 | 0.432 | 0.436 | 0.440 | 0.444 | 0.448 | 0.452 | 0.456 | 0.460 |
| 27.5 | 0.455 | 0.459 | 0.463 | 0.467 | 0.471 | 0.475 | 0.480 | 0.485 | 0.490 | 0.495 | 0.500 |
| 28.0 | 0.490 | 0.494 | 0.498 | 0.502 | 0.506 | 0.510 | 0.516 | 0.522 | 0.528 | 0.534 | 0.540 |
| 28.5 | 0.525 | 0.530 | 0.535 | 0.540 | 0.545 | 0.550 | 0.555 | 0.560 | 0.565 | 0.570 | 0.575 |
| 29.0 | 0.560 | 0.566 | 0.572 | 0.578 | 0.584 | 0.590 | 0.594 | 0.598 | 0.602 | 0.606 | 0.610 |
| 29.5 | 0.595 | 0.601 | 0.607 | 0.613 | 0.619 | 0.625 | 0.629 | 0.633 | 0.637 | 0.641 | 0.645 |
| 30.0 | 0.630 | 0.636 | 0.642 | 0.648 | 0.654 | 0.660 | 0.664 | 0.668 | 0.672 | 0.676 | 0.680 |

ANEXO F
RESULTADOS DEL ESTUDIO EXPERIMENTAL EN EL ÁREA DE
CRISTALIZACIÓN EN LA EMPRESA AGROPUCALÀ

TABLA F.1.- Características de la Masa Cocida al inicio del proceso en Lado A

| N° | Lado | Tacho | Hora de Descarga | T °C | Masa de Descarga | | | Miel de Descarga | | |
|-------|------|-------|------------------|-------|------------------|-------|--------|------------------|-------|--------|
| | | | | | Brix | Pol | Pureza | Brix | Pol | Pureza |
| 1 | A | 3 | 11/02/2014 10:05 | 70 | 99.90 | 52.15 | 52.20 | 97.30 | 36.39 | 37.40 |
| 2 | A | 3 | 13/02/2014 09:00 | 70 | 99.96 | 54.17 | 54.19 | 95.06 | 37.91 | 39.88 |
| 3 | A | 3 | 14/02/2014 09:10 | 73 | 99.90 | 54.49 | 54.54 | 95.26 | 37.61 | 39.48 |
| 4 | A | 3 | 15/02/2014 17:00 | 70 | 99.96 | 54.17 | 54.19 | 96.70 | 37.57 | 38.86 |
| 5 | A | 2 | 17/02/2014 07:00 | 75 | 99.90 | 54.47 | 54.52 | 96.70 | 39.34 | 40.68 |
| 6 | A | 2 | 18/02/2014 10:00 | 70 | 99.96 | 54.76 | 54.78 | 96.56 | 37.85 | 39.20 |
| 7 | A | 3 | 19/02/2014 11:10 | 65 | 99.96 | 55.35 | 55.37 | 96.86 | 39.04 | 40.31 |
| 8 | A | 2 | 20/02/2014 10:20 | 70 | 99.96 | 58.86 | 58.88 | 96.26 | 40.82 | 42.40 |
| 9 | A | 2 | 21/02/2014 14:30 | 75 | 99.54 | 55.29 | 55.55 | 96.48 | 38.75 | 40.16 |
| 10 | A | 1 | 22/02/2014 17:40 | 70 | 99.72 | 56.54 | 56.70 | 96.48 | 39.04 | 40.47 |
| 11 | A | 2 | 23/02/2014 21:20 | 72 | 99.84 | 58.88 | 58.97 | 97.30 | 40.79 | 41.92 |
| 12 | A | 3 | 24/02/2014 15:20 | 76 | 99.66 | 55.95 | 56.14 | 96.48 | 39.04 | 40.47 |
| 13 | A | 1 | 27/02/2014 05:30 | 73 | 99.84 | 55.66 | 55.75 | 97.90 | 38.72 | 39.55 |
| 14 | A | 2 | 28/02/2014 13:30 | 68 | 99.84 | 56.54 | 56.63 | 96.10 | 39.35 | 40.95 |
| 15 | A | 3 | 02/03/2014 19:00 | 72 | 99.84 | 53.90 | 53.99 | 96.70 | 37.57 | 38.86 |
| 16 | A | 3 | 08/03/2014 07:15 | 72 | 99.84 | 55.08 | 55.17 | 95.46 | 38.19 | 40.01 |
| 17 | A | 3 | 09/03/2014 18:00 | 75 | 99.96 | 54.17 | 54.19 | 97.65 | 37.54 | 38.45 |
| 18 | A | 2 | 10/03/2014 16:00 | 70 | 99.90 | 54.78 | 54.83 | 96.66 | 37.57 | 38.87 |
| 19 | A | 3 | 11/03/2014 17:50 | 72 | 99.84 | 55.66 | 55.75 | 97.30 | 38.73 | 39.81 |
| 20 | A | 2 | 12/03/2014 19:00 | 70 | 99.96 | 56.81 | 56.83 | 96.70 | 38.75 | 40.07 |
| 21 | A | 3 | 14/03/2014 13:30 | 72 | 98.16 | 55.41 | 56.45 | 96.86 | 39.34 | 40.61 |
| 22 | A | 2 | 15/03/2014 07:40 | 71 | 99.96 | 57.40 | 57.42 | 97.30 | 39.91 | 41.02 |
| 23 | A | 3 | 16/03/2014 11:00 | 68 | 99.72 | 56.83 | 56.99 | 97.30 | 39.61 | 40.71 |
| 24 | A | 3 | 22/03/2014 07:45 | 77 | 99.72 | 54.20 | 54.35 | 97.08 | 37.85 | 38.99 |
| 25 | A | 1 | 23/03/2014 07:05 | 75 | 99.84 | 54.20 | 54.29 | 95.66 | 37.90 | 39.62 |
| 26 | A | 2 | 24/03/2014 18:50 | 78 | 99.84 | 53.31 | 53.40 | 97.16 | 37.27 | 38.35 |
| Media | | | | 71.88 | 99.79 | 55.35 | 55.47 | 96.66 | 38.56 | 39.89 |
| Min. | | | | 65.00 | 98.16 | 52.15 | 52.20 | 95.06 | 36.39 | 37.40 |
| Max. | | | | 78.00 | 99.96 | 58.88 | 58.97 | 97.90 | 40.82 | 42.40 |

Fuente: Elaboración Propia

TABLA F.2.- Características de la Masa Cocida al final del enfriamiento en Lado A

| N° | Lado | Tacho | Hora | T °C | Masa de Cristalización | | | Miel de Cristalización | | |
|-------|------|-------|------------------|-------|---------------------------|-------|--------|---------------------------|-------|--------|
| | | | | | Brix | Pol | Pureza | Brix | Pol | Pureza |
| 1 | A | 3 | 12/02/2014 05:00 | 40 | 95.88 | 49.63 | 51.76 | 95.25 | 32.69 | 32.69 |
| 2 | A | 3 | 14/02/2014 02:30 | 37 | 94.62 | 52.02 | 54.98 | 95.06 | 34.63 | 34.63 |
| 3 | A | 3 | 15/02/2014 09:00 | 37 | 95.26 | 50.53 | 53.05 | 95.26 | 33.62 | 33.62 |
| 4 | A | 3 | 16/02/2014 13:00 | 40 | 96.26 | 51.71 | 53.71 | 96.48 | 34.08 | 34.08 |
| 5 | A | 2 | 18/02/2014 06:00 | 37 | 96.06 | 51.69 | 53.81 | 95.46 | 33.49 | 35.09 |
| 6 | A | 2 | 18/02/2014 22:00 | 45 | 96.10 | 51.69 | 53.79 | 95.04 | 32.92 | 34.64 |
| 7 | A | 3 | 20/02/2014 07:30 | 37 | 96.86 | 51.96 | 53.64 | 96.86 | 33.76 | 34.85 |
| 8 | A | 2 | 20/02/2014 18:45 | 44 | 97.76 | 55.14 | 56.40 | 96.86 | 37.28 | 38.49 |
| 9 | A | 2 | 22/02/2014 06:00 | 45 | 95.64 | 52.59 | 54.99 | 95.85 | 34.36 | 35.85 |
| 10 | A | 1 | 23/02/2014 05:00 | 44 | 95.88 | 53.45 | 55.74 | 96.45 | 34.64 | 35.91 |
| 11 | A | 2 | 24/02/2014 06:00 | 47 | 96.70 | 54.31 | 56.16 | 96.86 | 36.69 | 37.88 |
| 12 | A | 3 | 25/02/2014 14:30 | 37 | 96.86 | 52.84 | 54.55 | 97.08 | 33.74 | 34.76 |
| 13 | A | 1 | 27/02/2014 15:25 | 47 | 96.70 | 52.25 | 54.04 | 96.26 | 34.05 | 35.37 |
| 14 | A | 2 | 01/03/2014 10:30 | 35 | 95.43 | 53.18 | 55.72 | 95.43 | 34.08 | 35.71 |
| 15 | A | 3 | 03/03/2014 17:00 | 44 | 97.08 | 51.35 | 52.90 | 96.48 | 33.17 | 34.38 |
| 16 | A | 3 | 09/03/2014 01:30 | 40 | 95.66 | 52.00 | 54.36 | 95.25 | 33.49 | 35.16 |
| 17 | A | 3 | 10/03/2014 01:30 | 47 | 96.84 | 51.37 | 53.05 | 96.63 | 33.17 | 34.33 |
| 18 | A | 2 | 11/03/2014 07:00 | 45 | 96.46 | 51.67 | 53.56 | 96.07 | 33.18 | 34.54 |
| 19 | A | 3 | 12/03/2014 11:00 | 40 | 96.26 | 52.86 | 54.91 | 96.24 | 33.77 | 35.09 |
| 20 | A | 2 | 13/03/2014 04:15 | 47 | 95.66 | 53.47 | 55.89 | 95.04 | 34.09 | 35.87 |
| 21 | A | 3 | 15/03/2014 07:15 | 40 | 96.03 | 53.45 | 55.66 | 96.84 | 34.64 | 35.77 |
| 22 | A | 2 | 15/03/2014 22:30 | 45 | 96.26 | 54.04 | 56.13 | 96.24 | 35.24 | 36.62 |
| 23 | A | 3 | 17/03/2014 08:30 | 37 | 97.08 | 53.70 | 55.31 | 96.86 | 34.35 | 35.46 |
| 24 | A | 3 | 22/03/2014 22:20 | 47 | 96.84 | 51.37 | 53.05 | 96.06 | 33.48 | 34.85 |
| 25 | A | 1 | 23/03/2014 20:30 | 47 | 96.06 | 51.39 | 53.50 | 95.43 | 33.79 | 35.40 |
| 26 | A | 2 | 25/03/2014 07:30 | 45 | 96.70 | 50.20 | 51.91 | 96.70 | 32.29 | 33.39 |
| Media | | | | 42.15 | 96.27 | 52.30 | 54.33 | 96.08 | 34.03 | 35.17 |
| Min. | | | | 35.00 | 94.62 | 49.63 | 51.76 | 95.04 | 32.29 | 32.69 |
| Max. | | | | 47.00 | 97.76 | 55.14 | 56.40 | 97.08 | 37.28 | 38.49 |

Fuente: Elaboración Propia

TABLA F.3.- Características de la Masa Cocida al inicio del proceso en Lado B

| N° | Lado | Tacho | Hora de Descarga | T °C | Masa de Descarga | | | Miel de Descarga | | |
|-------|------|-------|------------------|-------|------------------|-------|--------|------------------|-------|--------|
| | | | | | Brix | Pol | Pureza | Brix | Pol | Pureza |
| 1 | B | 1 | 10/02/2014 17:10 | 76 | 99.84 | 53.32 | 53.41 | 96.10 | 37.59 | 39.12 |
| 2 | B | 3 | 12/02/2014 09:25 | 77 | 99.84 | 51.85 | 51.93 | 92.82 | 35.90 | 38.68 |
| 3 | B | 3 | 13/02/2014 18:40 | 71 | 99.90 | 54.47 | 54.52 | 95.86 | 37.88 | 39.52 |
| 4 | B | 3 | 15/02/2014 09:00 | 76 | 99.84 | 54.78 | 54.87 | 97.65 | 38.42 | 39.35 |
| 5 | B | 2 | 16/02/2014 09:40 | 75 | 99.84 | 55.95 | 56.04 | 97.08 | 39.03 | 40.20 |
| 6 | B | 1 | 17/02/2014 15:00 | 70 | 99.96 | 54.47 | 54.49 | 96.86 | 39.34 | 40.61 |
| 7 | B | 1 | 18/02/2014 15:30 | 69 | 99.96 | 55.05 | 55.07 | 98.36 | 38.12 | 38.75 |
| 8 | B | 3 | 19/02/2014 16:15 | 72 | 99.96 | 55.64 | 55.66 | 97.65 | 38.42 | 39.35 |
| 9 | B | 1 | 20/02/2014 18:00 | 72 | 99.66 | 54.20 | 54.38 | 95.88 | 37.59 | 39.21 |
| 10 | B | 1 | 22/02/2014 09:20 | 75 | 99.84 | 55.95 | 56.04 | 96.10 | 38.76 | 40.34 |
| 11 | B | 3 | 23/02/2014 07:00 | 75 | 99.96 | 58.57 | 58.59 | 96.48 | 40.22 | 41.68 |
| 12 | B | 1 | 24/02/2014 06:40 | 75 | 99.96 | 58.86 | 58.88 | 97.30 | 40.79 | 41.92 |
| 13 | B | 3 | 25/02/2014 14:45 | 70 | 99.72 | 54.78 | 54.93 | 97.46 | 38.15 | 39.14 |
| 14 | B | 3 | 26/02/2014 13:00 | 72 | 99.72 | 54.47 | 54.62 | 96.86 | 37.87 | 39.09 |
| 15 | B | 3 | 27/02/2014 20:20 | 70 | 99.84 | 54.78 | 54.87 | 96.63 | 38.16 | 39.49 |
| 16 | B | 3 | 01/03/2014 06:10 | 70 | 99.78 | 57.12 | 57.25 | 96.26 | 39.94 | 41.49 |
| 17 | B | 2 | 03/03/2014 14:20 | 71 | 99.90 | 55.65 | 55.71 | 96.48 | 38.46 | 39.86 |
| 18 | B | 2 | 09/03/2014 06:00 | 70 | 99.90 | 55.95 | 56.01 | 96.70 | 38.75 | 40.07 |
| 19 | B | 2 | 10/03/2014 09:10 | 77 | 99.96 | 55.35 | 55.37 | 97.46 | 38.15 | 39.14 |
| 20 | B | 3 | 12/03/2014 07:00 | 76 | 99.96 | 54.47 | 54.49 | 97.08 | 37.56 | 38.69 |
| 21 | B | 2 | 13/03/2014 14:00 | 75 | 99.54 | 55.07 | 55.32 | 96.10 | 38.18 | 39.73 |
| 22 | B | 3 | 14/03/2014 21:00 | 77 | 99.72 | 54.20 | 54.35 | 95.86 | 37.88 | 39.52 |
| 23 | B | 3 | 15/03/2014 17:05 | 70 | 99.78 | 56.54 | 56.66 | 97.46 | 39.32 | 40.34 |
| 24 | B | 3 | 17/03/2014 13:50 | 73 | 99.84 | 54.78 | 54.87 | 97.76 | 38.13 | 39.00 |
| 25 | B | 1 | 21/03/2014 15:40 | 75 | 99.84 | 53.90 | 53.99 | 96.10 | 37.00 | 38.51 |
| 26 | B | 1 | 22/03/2014 18:00 | 77 | 99.84 | 53.60 | 53.69 | 96.26 | 37.30 | 38.74 |
| 27 | B | 1 | 23/03/2014 18:05 | 72 | 99.84 | 54.20 | 54.29 | 96.46 | 38.46 | 39.87 |
| Media | | | | 73.26 | 99.84 | 55.11 | 55.20 | 96.63 | 38.35 | 39.68 |
| Min. | | | | 69.00 | 99.54 | 51.85 | 51.93 | 92.82 | 35.90 | 38.51 |
| Max. | | | | 77.00 | 99.96 | 58.86 | 58.88 | 98.36 | 40.79 | 41.92 |

Fuente: Elaboración Propia

TABLA F.4.- Características de la Masa Cocida al final del enfriamiento en Lado B

| N° | Lado | Tacho | Hora | T °C | Masa de Cristalización | | | Miel de Cristalización | | |
|-----------|------|-------|------------------|-------|------------------------|-------|--------|------------------------|-------|--------|
| | | | | | Brix | Pol | Pureza | Brix | Pol | Pureza |
| 1 | B | 1 | 11/02/2014 11:00 | 44 | 95.04 | 49.67 | 52.26 | 96.33 | 35.04 | 35.04 |
| 2 | B | 3 | 12/02/2014 22:00 | 54 | 92.64 | 47.40 | 51.16 | 90.42 | 35.21 | 35.21 |
| 3 | B | 3 | 14/02/2014 10:30 | 46 | 95.86 | 51.69 | 53.92 | 95.47 | 35.70 | 35.70 |
| 4 | B | 3 | 16/02/2014 05:00 | 40 | 96.66 | 52.57 | 54.38 | 96.46 | 35.01 | 35.01 |
| 5 | B | 2 | 17/02/2014 03:30 | 44 | 96.86 | 53.13 | 54.85 | 96.46 | 35.91 | 35.91 |
| 6 | B | 1 | 18/02/2014 11:15 | 40 | 96.86 | 52.25 | 53.94 | 96.86 | 35.23 | 36.37 |
| 7 | B | 1 | 19/02/2014 05:00 | 51 | 97.08 | 52.52 | 54.10 | 96.70 | 33.76 | 34.91 |
| 8 | B | 3 | 20/02/2014 07:30 | 40 | 96.86 | 52.55 | 54.25 | 97.08 | 34.04 | 35.06 |
| 9 | B | 1 | 21/02/2014 10:30 | 47 | 95.04 | 51.43 | 54.12 | 95.46 | 33.79 | 35.39 |
| 10 | B | 1 | 22/02/2014 21:07 | 51 | 95.66 | 52.88 | 55.28 | 95.43 | 34.96 | 36.64 |
| 11 | B | 3 | 23/02/2014 23:50 | 45 | 97.08 | 53.41 | 55.01 | 96.26 | 36.12 | 37.52 |
| 12 | B | 1 | 24/02/2014 18:30 | 50 | 96.06 | 54.04 | 56.25 | 96.26 | 36.71 | 38.13 |
| 13 | B | 3 | 26/02/2014 06:00 | 44 | 96.26 | 51.98 | 54.00 | 96.24 | 33.77 | 35.09 |
| 14 | B | 3 | 27/02/2014 04:52 | 46 | 97.08 | 51.94 | 53.50 | 95.88 | 33.77 | 35.22 |
| 15 | B | 3 | 28/02/2014 18:30 | 40 | 96.84 | 51.67 | 53.35 | 96.06 | 33.77 | 35.16 |
| 16 | B | 3 | 02/03/2014 16:00 | 33 | 96.26 | 54.33 | 56.44 | 96.45 | 35.23 | 36.52 |
| 17 | B | 2 | 04/03/2014 07:00 | 45 | 96.70 | 52.25 | 54.04 | 96.06 | 34.36 | 35.77 |
| 18 | B | 2 | 09/03/2014 21:30 | 47 | 95.85 | 52.57 | 54.84 | 96.24 | 34.95 | 36.31 |
| 19 | B | 2 | 10/03/2014 18:15 | 50 | 96.26 | 52.27 | 54.30 | 96.06 | 34.07 | 35.46 |
| 20 | B | 3 | 12/03/2014 18:30 | 54 | 96.48 | 51.67 | 53.55 | 95.88 | 33.77 | 35.22 |
| 21 | B | 2 | 14/03/2014 01:30 | 51 | 95.25 | 51.12 | 53.67 | 95.46 | 34.37 | 36.01 |
| 22 | B | 3 | 15/03/2014 09:45 | 51 | 95.22 | 51.41 | 53.99 | 95.22 | 34.08 | 35.79 |
| 23 | B | 3 | 16/03/2014 16:30 | 40 | 96.86 | 53.72 | 55.46 | 97.05 | 34.92 | 35.98 |
| 24 | B | 3 | 18/03/2014 10:00 | 44 | 96.70 | 51.96 | 53.73 | 97.08 | 33.74 | 34.76 |
| 25 | B | 1 | 22/03/2014 03:20 | 50 | 95.04 | 50.85 | 53.50 | 95.04 | 33.21 | 34.95 |
| 26 | B | 1 | 23/03/2014 06:30 | 51 | 95.85 | 50.81 | 53.00 | 95.26 | 33.49 | 35.16 |
| 27 | B | 1 | 24/03/2014 18:00 | 40 | 96.46 | 51.37 | 53.26 | 96.42 | 34.04 | 35.30 |
| Medi a | | | | 45.85 | 96.10 | 51.98 | 54.08 | 95.91 | 34.56 | 35.69 |
| Min. | | | | 33.00 | 92.64 | 47.40 | 51.16 | 90.42 | 33.21 | 34.76 |
| Max. | | | | 54.00 | 97.08 | 54.33 | 56.44 | 97.08 | 36.71 | 38.13 |

Fuente: Elaboración Propia