

UNIVERSIDAD PRIVADA ANTENOR ORREGO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA EN INDUSTRIAS
ALIMENTARIAS



Efecto de la pureza de la miel diluida “B” y tiempo de proceso de cristalización, en el rendimiento y tamaño de cristales en la masa cocida “C”, durante la elaboración de azúcar rubia

TESIS

Para obtener el Título Profesional de:

INGENIERO EN INDUSTRIAS ALIMENTARIAS

RONALD ALEXANDER LINARES ANGULO

TRUJILLO, PERU

2017

La presente tesis ha sido aprobada por el siguiente jurado:

Dr. Fernando Rodríguez Avalos

PRESIDENTE

Dr. Antonio Rodríguez Zevallos

SECRETARIO

Ms. Carla Pretell Vásquez

VOCAL

Dr. José Luis Soriano Colchado

ASESOR

DEDICATORIA

A Dios, luz que guía mis sueños y los conduce a la excelencia.

A mi madre Olga, por su apoyo incondicional

A mi esposa Alicia, por su cariño y el aliento necesario para concluir este
trabajo de investigación

A mis hijos Alexander y Víctor

A mis familiares y amigos por apoyarme en cada instante de mi vida.

AGRADECIMIENTO

A Dios y a mi familia, porque nunca dudaron de mis logros y me brindaron todo lo necesario para salir adelante.

Al Dr. José Luis Soriano Colchado como asesor y amigo, por brindarme sabios consejos y transmitirme parte de su experiencia profesional para el desarrollo y culminación del presente trabajo de investigación.

A los Miembros del Jurado: Dr. Fernando Rodríguez, Dr. Antonio Rodríguez Zevallos y Ms. Carla Pretell Vásquez por sus acertadas observaciones en la evaluación de este trabajo de investigación y por formar parte de mi formación académica a lo largo de los 5 años universitarios, permitiéndome ser el profesional que soy hoy.

A mis amigos en general por el apoyo y amistad brindados en los años de vida universitaria, por compartir mis aciertos y fracasos y a pesar de eso seguir creyendo en mí hasta el día de hoy.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
CARATULA	i
MIEMBROS DEL JURADO	ii
DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
ÍNDICE GENERAL	v
ÍNDICE DE CUADROS.....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
ÍNDICE DE ANEXOS.....	ix
RESUMEN.....	x
ABSTRACT	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
II. REVISION DE BIBLIOGRAFÍA	3
2.1. Azúcar.....	3
2.2. Cristalización.....	4
2.2.1. Fundamentos de la cristalización	4
2.2.2. Solubilidad y sobresaturación.....	4
2.2.3. Nucleación y crecimiento de cristales.....	6
2.2.4. Métodos de cristalización	6
a. Cristalización por semillamiento	6
b. Cristalización por enfriamiento	8
2.3. Proceso de cristalización de sacarosa	8
2.3.1. Esquemas de cocimientos de azúcar	9
2.3.2. Descripción de los esquemas de cocimiento.....	11

a. Sistema de cocción de templa única	12
b. Sistema de dos cocimientos.....	12
c. Sistema de tres cocimientos.....	12
2.3.3. Tiempo de proceso de cristalización.....	14
2.3.4. Principio de funcionamiento de un tacho de cocimiento	15
III. MATERIALES Y MÉTODOS	18
3.1. Lugar de ejecución.....	18
3.2. Materiales, reactivos y equipos.....	18
3.3. Esquema experimental	18
3.4. Diagrama de flujo de la elaboración de azúcar rubia.....	19
3.5. Métodos de análisis	24
3.5.1. Sólidos solubles	24
3.5.2. pH.....	25
3.5.3. Grado de polarización	25
3.5.4. Pureza de mieles.....	25
3.5.5. Rendimiento de cristales	26
3.5.6. Tamaño de cristal	27
3.6. Análisis estadístico	27
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	28
V. CONCLUSIONES.....	37
VI. RECOMENDACION	38
VII. BIBLIOGRAFÍA	39

ÍNDICE DE CUADROS

	Pág
Cuadro 1. Tiempos de operación de un sistema de cocimiento de tres templeas.....	15
Cuadro 2. Características fisicoquímicas del jugo de caña.....	28
Cuadro 3. Prueba de Levene modificada para valores de rendimiento de cristales en la masa cocida "C".....	29
Cuadro 4. Análisis de varianza para valores de rendimiento de cristales en la masa cocida "C".....	30
Cuadro 5. Prueba de Duncan para valores de rendimiento de cristales en la masa cocida "C".....	31
Cuadro 6. Prueba de Levene modificada para tamaño de cristales en la masa cocida "C" durante la elaboración de azúcar rubia.....	33
Cuadro 7. Análisis de varianza para tamaño del cristal de sacarosa.....	34
Cuadro 8. Prueba de Duncan para tamaño de cristal de sacarosa.....	35

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Solubilidad de la sacarosa pura en agua en función a la temperatura.....	6
Figura 2. Esquema de operación de un sistema básico de cocimiento de tres templas.....	14
Figura 3. Esquema experimental para la investigación sobre efecto de la pureza de la miel y tiempo de proceso de cristalización.....	18
Figura 4. Diagrama de flujo de la elaboración de azúcar rubia.....	19
Figura 5. El rendimiento de cristales en la masa cocida "C".....	29
Figura 6. Tamaño del cristal de sacarosa en función a la pureza y tiempo de secado.....	33

ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Características del jugo de caña.....	42
Anexo 2. Características de la miel diluida "B"	43
Anexo 3. Rendimiento y tamaño de cristales de sacarosa para pureza 50 de miel diluida "B".....	44
Anexo 4. Rendimiento y tamaño de cristales de sacarosa para pureza 50 de miel diluida "B".....	44
Anexo 5. Rendimiento y tamaño de cristales de sacarosa para pureza 50 de miel diluida "B".....	44

RESUMEN

Se evaluó el efecto de la pureza (50, 55 y 60) de la miel diluida "B" y tiempo (2.0, 2.5 y 3.0 h) en el proceso de cristalización, en el rendimiento y tamaño de cristales en la masa cocida "C", durante la elaboración de azúcar rubia. Caña de azúcar, en estado de maduración óptima (14 °Brix), fue transportada al ingenio donde fue procesada y el jugo clarificado obtenido fue concentrado de 14 °Brix a 65 °Brix (sólidos disueltos) y cristalizado en un sistema de tres cocimientos.

El análisis estadístico determinó efecto significativo de la pureza de la miel diluida "B" y tiempo de proceso de cristalización, en el tamaño de cristales en la masa cocida "C", durante la elaboración de azúcar rubia; encontrándose una relación directamente proporcional. El tratamiento con pureza de la miel diluida "B" de 60 y tiempo de 3.0 h en el proceso de cristalización reportó mayor rendimiento (52.71%) de cristales en la masa cocida "C" y mayor tamaño del cristales (0.389 μm).

ABSTRACT

The effect of the purity (50, 55 and 60) of diluted honey "B" and drying time (2.0, 2.5 and 3.0 h) in the crystallization process on the yield and size of crystals in the cooked mass "C", was evaluated during the elaboration of blonde sugar. Sugar cane, in optimum maturation stage (14 ° Brix), was transported to the sugar mill where it was processed and the clarified juice obtained was concentrated from 14 ° Brix to 65 ° Brix (dissolved solids) and crystallized in a three - batch system.

Statistical analysis determined a significant effect of the purity of diluted honey "B" and time of crystallization process, on the size of crystals in the "C" cooked mass, during the elaboration of blond sugar; being a directly proportional relation. The purity of the diluted honey "B" of 60 and time of 3.0 h in the crystallization process reported a higher yield (52.71%) of crystals in the "C" mass and the larger crystals (0.389 μm).

I. INTRODUCCIÓN

La pureza de las mieles es uno de los parámetros de gran importancia durante la operación de cristalización. Este término se emplea para indicar el contenido de azúcar presente en las soluciones a la entrada o salida del cristizador y repercute en la calidad del producto terminado, debido a que si la alimentación al tacho se hace con meladura de baja pureza, afecta al proceso debido a que el tiempo de residencia se incrementa, pues será necesario elevar esta pureza con evaporación en el cristizador, lo que afectará el costo de producción del producto terminado y a la falta de estandarización del cristal de sacarosa (González, 2013 y Rein, 2012).

El cristal de sacarosa de los ingenios se obtiene por medio de la cristalización de las mieles o jarabes que entran a los cristizadores (tachos). Mediante una sobresaturación de la solución, se logra separar el sólido y obtener una mayor pureza del cristal. Posee gran importancia económica en la industria, ya que requiere mucho menos energía para la separación de lo que utiliza la destilación y otros métodos de separación comunes (Domínguez, 2013).

En cristizadores comerciales no solo interesa el rendimiento y la pureza de los cristales, sino que también el tamaño y la forma de los mismos. Casi siempre se desea que los cristales tengan tamaño uniforme. La uniformidad del tamaño es indispensable para evitar apelmazamientos en el empaque, facilitar la descarga y para un comportamiento uniforme en su uso (Domínguez, 2013).

Por todo lo explicado anteriormente, este proyecto pretende evaluar el efecto de la pureza de la miel y tiempo de proceso de cristalización por siembra, en la pureza y tamaño de grano durante la elaboración de azúcar rubia, por lo que se planteó el siguiente problema:

¿Cuál será el efecto de la pureza (50, 55 y 60) de la miel diluida “B” y tiempo (2.0, 2.5 y 3.0 h) de proceso de cristalización, en el rendimiento y tamaño de cristales en la masa cocida “C”, durante la elaboración de azúcar rubia?

Objetivos:

Evaluar el efecto de la pureza (50, 55 y 60) de la miel diluida “B” y tiempo (2.0, 2.5 y 3.0 h) de proceso de cristalización, en el rendimiento y tamaño de cristales en la masa cocida “C”, durante la elaboración de azúcar rubia.

Determinar la pureza de la miel diluida “B” y tiempo de proceso de cristalización, que permita obtener el mayor rendimiento y tamaño adecuado de cristales en la masa cocida “C”, durante la elaboración de azúcar rubia.

II. REVISION DE BIBLIOGRAFÍA

2.1. Azúcar

El azúcar es el producto sólido derivado de la caña de azúcar (*Saccharum* sp), constituido esencialmente por cristales sueltos de sacarosa, en una concentración mínima de 99,40 % de polarización (Chen, 1991).

La caña de azúcar contiene entre 8 y 15% de sacarosa. La caña se somete a un proceso de molienda de donde se obtiene el jugo de la caña, el cual se concentra y cristaliza al evaporarse el agua por calentamiento. Dependiendo del tratamiento químico al que es sometido, los cristales formados pueden ser: azúcar crudo, blanco directo o refinado (Rein, 2012).

En las refinerías el azúcar crudo o blanco sulfitado es disuelto y convertido en licor, luego es limpiado y cristalizado nuevamente para producir la azúcar refinada. Los azúcares blancos son alimentos muy puros, con más del 99% de sacarosa, mientras que los azúcares crudos poseen un contenido algo menor de sacarosa con, al menos, el 96% pues conservan aún parte de la miel a partir de la cual fueron fabricados (Rein, 2012).

Según Rein (2012) el azúcar se puede clasificar por su grado de refinación. Normalmente, la refinación se expresa visualmente a través del color (azúcar moreno, blanco y refino), y por el porcentaje de sacarosa que contienen los cristales.

Azúcar moreno. El auténtico azúcar moreno o “crudo” se obtiene del jugo de caña de azúcar y no se somete a sulfitación, sólo es cristalizado y centrifugado. Este producto integral debe su color a una película de miel que envuelve cada cristal, el cual tiene entre

96 y 98 % de sacarosa. Su contenido mineral es superior al azúcar blanco, pero muy inferior al de la melaza.

Azúcar blanco. Contiene 99.5% de sacarosa y también es denominada azúcar sulfitada.

Azúcar refino. Es altamente pura, es decir, entre 99.8 y 99.9 % de sacarosa. Se le aplican reactivos como fosfatos, carbonatos y cal para extraer la mayor cantidad de impurezas, hasta lograr su máxima pureza.

2.2. Cristalización

2.2.1. Fundamentos de la cristalización

Cristalización es la formación de partículas sólidas a partir de una fase homogénea. La formación de partículas sólidas puede tener lugar a partir de un vapor, como la nieve, mediante la solidificación de un líquido fundido, como ocurre en la formación de grandes mono cristales, o bien como cristalización de una disolución líquida (Rein, 2012).

2.2.2. Solubilidad y sobresaturación

Según Rein (2012) una solución saturada de sacarosa se encuentra en equilibrio termodinámico con la fase sólida de sacarosa, contiene alrededor de dos partes de sacarosa por cada parte de agua a temperatura ambiente, y casi cinco partes de sacarosa por cada parte de agua. Para cristalizar la sacarosa se requiere elevar su concentración por encima de aquella correspondiente a una solución saturada y llevarla en forma regulada y con precisión a la concentración requerida, para lograr la cristalización.

La solubilidad de soluciones puras de sacarosa se presenta en la Figura 1. El estado de saturación está representado por

la curva $y_p=1$. La Figura también muestra las curvas correspondientes a $y_p= 1.2$ y 1.3 . La región donde el coeficiente de sobresaturación está entre 1.0 y 1.2 se conoce como región metaestable. En esta región los cristales de azúcar crecen sin que se produzca nucleación de nuevos granos de azúcar. Esta es la región donde la cristalización debe ser efectuada. La región comprendida entre 1.2-1.3 se conoce como región intermedia, donde los cristales pueden continuar creciendo, pero con formación de nuevos núcleos cuando hay presencia de cristales de azúcar. La región que se encuentra por encima de la curva del coeficiente de sobresaturación 1.3 se conoce como región lábil; en esta zona se produce nucleación espontánea.

Para una solución subsaturada que se encuentra en cierto punto por debajo de la curva de saturación (A en la Figura 1), la solución puede llevarse hasta la región de sobresaturación mediante evaporación a temperatura constante, o mediante enfriamiento manteniendo constante el contenido de sólidos disueltos.

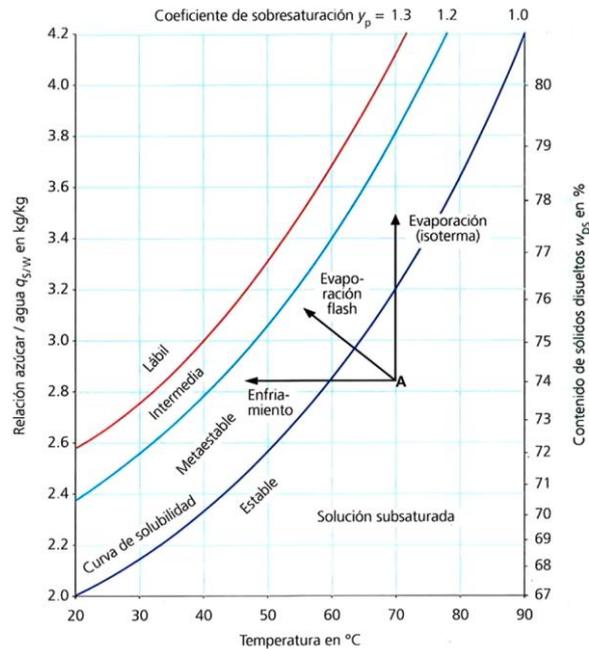


Figura 1. Solubilidad de la sacarosa pura en agua en función a la temperatura.

Fuente: Rein (2012).

2.2.3. Nucleación y crecimiento de cristales

El crecimiento de cristales es un proceso complejo y se puede considerar como un proceso cinético de reacción, donde la fuerza impulsora es el grado de sobresaturación. Las moléculas de sacarosa tienen que esparcirse o difundirse hasta el cristal y luego ser incorporadas a la estructura reticular del cristal (Rein, 2012).

2.2.4. Métodos de cristalización

a. Cristalización por semillamiento

La nucleación usualmente se induce en los tachos mediante adición de una suspensión o que contiene partículas de azúcar molidas muy finamente. Varios métodos para la preparación de la suspensión son utilizados, pero

normalmente involucran el uso de molinos de bolas para preparar una suspensión de alcohol y azúcar refinada durante cierto periodo.

Las condiciones para formar un cristal se basa en la densidad del licor y la temperatura la cuales deben mantenerse constantes, para que permitan la creación del cristal deseado.

Mayor a 1,3 es un área de muy alta saturación en donde se producen nuevos cristales que emergen en un área inestable (sin influencia externa).

Entre 1,2 a 1,3 es un área intermedia, se producen nuevos cristales

Entre 1,0 a 1,2 es un área meta estable donde la producción es idónea

Menor de 1,0 es un área de baja saturación en la que los cristales son disueltos.

(Rein, 2012).

Dependiendo del método de semillado y el producto final deseado existen diferentes principios de cristalización:

- Cristalización normal con semilla (“semillado en choque”) con el desarrollo del grano al máximo nivel y el apriete final a la máxima densidad.
- Cristalización normal con el uso de cristales de pie de masa hechos previamente.

Producción de cristales de pie de masa. Este principio de cristalización trabaja como la cristalización de semilla, aunque a diferencia de la cristalización normal, entre más cristales son producidos, el desarrollo del grano es completado a un

límite predefinido en la primera fase de del desarrollo del grano. Los cristales de pie de masa son entonces vaciados dentro de un receptor de masa o receptor de cristales de pie de masa, para uso futuro (Rein, 2012).

b. Cristalización por enfriamiento

La cristalización en un tacho al vacío continúa hasta alcanzar un punto en el que una posterior cristalización llevaría a que la masa cocida dejara de circular o no pueda ser descargada del tacho. La masa cocida que abandona el tacho está sobresaturada y caliente, en el rango de 63 a 70 °C. El contenido de cristales es alto, pero aún es posible lograr un agotamiento adicional al enfriar la masa cocida antes de la centrifugación. Mientras la masa cocida se enfría, la velocidad de cristalización se reduce, pero un tiempo suficiente de retención en los cristalizadores por enfriamiento logrará la cristalización adicional deseada (Rein, 2012).

Al enfriarse la masa cocida y el azúcar cristalizarse aún más, la viscosidad o consistencia de la masa cocida se incrementa significativamente. La condición final de la masa cocida enfriada estará determinada por la consistencia que las centrifugas puedan manejar en el proceso de centrifugación y difiere según los diferentes grados y pureza de las masas cocidas (Rein, 2012).

2.3. Proceso de cristalización de sacarosa

La cristalización en las fábricas se produce bajo vacío e involucra procesos simultáneos de transferencia de masa y evaporación. El vacío es necesario para mantener la temperatura a un nivel suficientemente bajo que permita minimizar la formación del color y la inversión o degradación de sacarosa en el proceso (Rein, 2012).

Al iniciar el conocimiento discontinuo, el licor se concentra hasta alcanzar la zona metaestable. La cristalización se inicia adicionando semillas muy finas en forma de suspensión, las cuales proporcionan sitios de nucleación para comenzar la cristalización. A partir de entonces, la concentración del licor madre se controla de manera que la cristalización ocurra sin disolver ningún cristal y sin formación de nuevos núcleos. Para esto se requiere establecer suficiente área superficial de cristales y regular la alimentación del tacho para controlar la concentración del licor madre (Rein, 2012).

En algunas ocasiones el proceso comienza partiendo de un magma o pie de templa, es decir una mezcla de licor y cristales de un cocimiento previo, evitando así el proceso de semillamiento (Rein, 2012).

2.3.1. Esquemas de cocimientos de azúcar

El proceso de cocimiento de azúcar, es una de las etapas más importantes de la fabricación comercial de azúcar de caña, tanto cruda como refinada. En esta etapa se comienza a formar los cristales de azúcar y básicamente se compone de dos operaciones secuenciales: cristalización en caliente y cristalización en frío (Golato, 2014).

La cristalización en caliente se realiza en cuerpos llamados “tachos de cocimientos”, donde se cuece el “melado virgen” proveniente de la etapa de evaporación del jugo de caña, mezclados con otros productos intermedios a los que se denominan “masa cocida”. Esta operación se efectúa al vacío para trabajar con temperaturas menores al de la evaporación del agua pura (100 °C) (Golato, 2014).

Los tachos son evaporadores intermitentes del “melado virgen”, que posee una concentración aproximada de 70 °Bx y una pureza (cantidad de sacarosa) de 83 a 85%. Con la operación en los tachos se busca llevar el melado a una condición de solución azucarada sobresaturada para favorecer la formación y/o crecimiento de los cristales hasta un tamaño adecuado y uniforme. La operación al vacío garantiza que los cristales no adquieran una coloración fuerte por acción de temperaturas de ebullición elevadas (Golato, 2014).

La masa cocida obtenida se descarga en unos equipos llamados cristalizadores donde se finaliza el crecimiento de los cristales por enfriamiento de los mismos (cristalización en frío). El producto obtenido se descarga hacia una batería de centrifugas, para separar la miel madre de los cristales de azúcar (Golato, 2014).

Cabe destacar que el sistema de cocimiento puede ser realizado en partes, denominadas “templás” y representan las operaciones con que se forman las diferentes masas cocidas. La cantidad de templás a realizar depende del grado de agotamiento de la sacarosa en la masa cocida que se puede obtener de manera económica. Existen sistemas de una, dos, y tres templás, siendo el más común el de tres templás (Figura 1) (Golato, 2014).

La máxima recuperación de la sacarosa por cristalización no puede lograrse en una sola etapa. Existe cierto límite del contenido de cristales que se encuentra en el punto donde la masa cocida no puede fluir fuera del tacho. La cristalización se debe detener antes de alcanzar este punto y la masa

cocida debe centrifugarse para separar los cristales de la miel. Las mieles producidas contienen aún azúcar cristalizable y el proceso se repita, usualmente en una o dos etapas adicionales para lograr una recuperación óptima de sacarosa. La pureza de la masa cocida decrece sucesivamente con cada etapa, a medida que se remueve mayor cantidad de sacarosa. Varios esquemas de cristalización pueden ser utilizados para satisfacer la calidad de azúcar a ser producida de acuerdo con la pureza de la meladura.

Los siguientes esquemas de cristalización son utilizados comúnmente para la producción de azúcar crudo:

Esquema de dos cocimientos

Esquema de tres cocimientos

Esquema de doble Einwurf

Esquema Very High Pol.

(Rein, 2012).

2.3.2. Descripción de los esquemas de cocimiento

La elección del esquema de cocimiento afecta la cantidad total de masas cocidas y la demanda de energía de cristalización. Cada sistema ofrece diferentes ventajas y desventajas. El número de etapas requerido para lograr el agotamiento de la meladura hasta obtener la pureza de miel final depende en primer lugar de la pureza de la meladura. Las etapas de cristalización y sus productos luego de ser separados se identifican con letras. La etapa de mayor pureza se denomina etapa A, que produce miel A y azúcar A. Las otras etapas se denominan B y C, pero en el caso de esquemas de dos cocimientos la secuencia se altera y solo de producen azucares A y C (Rein, 2012).

a. Sistema de cocción de templa única

La cristalización en templa única, alimentada solamente de jarabe, resulta impracticable por dos motivos. Primero: la elevada viscosidad de la masa cocida. El alto contenido de granos y poca calidad del azúcar contenido de miel dificulta enormemente la descarga del tacho, por lo que la templa no podrá fluir adecuadamente a través de los canales de descarga hacia los cristalizadores y seguir su curso hacia las centrifugas. Segundo: la baja calidad del azúcar final. La poca fluidez de la masa cocida provoca que el purgado se tome más lento e incompleto. Así, la capa de miel que recubrirá los granos de azúcar al final de la purga será gruesa y de baja pureza, además de poseer una humedad elevada (Huaca, 2016).

b. Sistema de dos cocimientos

En este sistema las templeas “A” y “C” ebulen. El principal problema radica en obtener mieles “A” de pureza menores a 60 cuando las templeas “A” han sido alimentadas con magma de azúcar “C” y jarabe. Una miel “A” de alta pureza provoca un aumento de la pureza de la templa “C” lo que refleja un agotamiento ineficaz de la alimentación. Como el magma “C” y el jarabe son de alta pureza, la única manera de bajar la pureza de las templeas “A” es recircular miel “A” de baja pureza, lo que lleva a pérdidas de azúcar (Huaca, 2016).

c. Sistema de tres cocimientos

El sistema más utilizado es el de tres etapas de cristalización, donde se obtienen azúcares A y B para la venta. El azúcar A se cristaliza a partir de meladura utilizando como semilla un magma que consiste de azúcar C en agua (o jugo clarificado)

con pureza alrededor de 85. Por lo tanto, la masa cocida A tiene una pureza cercana a la de la meladura. La masa cocida A se centrifuga para obtener un azúcar A con pol relativamente alto (98-99 °Z) y miel A con una pureza alrededor de 20 unidades por debajo de la pureza de la meladura (Rein, 2012).

El azúcar B se cristaliza a partir de mieles A (pureza 60-70) y meladura, utilizando como semilla el mismo magma de azúcar C para iniciar la masa cocida B. La masa B se centrifuga utilizando máquinas discontinuas, obteniendo azúcar B con pol entre 97-98 °Z que se mezcla con el azúcar A para ser despachados en la fábrica.

El pie de templa para la semilla C consiste de una mezcla entre miel A y meladura con pureza alrededor de 70 o miel A con pureza entre 60 y 70. Los cocimientos de masa C se alimentan con miel B. La masa cocida C es centrifugada usando máquinas continuas para obtener azúcar C y miel final. El azúcar C, con pureza alrededor de 85, es mezclado para formar el magma que se utiliza como semilla para las etapas de cristalización A y B.

La pureza de la masa cocida B es mayor que la pureza de la miel A debido en parte a la influencia del semillamiento con magma C, pero también a la adición de meladura a la masa B para reducir la viscosidad. La pureza debe mantenerse en el rango de 70-75 para obtener azúcar B alrededor de 98 °Z, con cristales relativamente grandes y una capacidad aceptable en las centrífugas discontinuas. La alta pureza de las masas cocida B lleva a una pureza relativamente elevada de la miel de purga de segunda, lo cual a su vez incrementa la pureza

de la masa cocida C y la pureza de las mieles finales. Esta es la principal desventaja de este esquema (Rein, 2012).

En la Figura 2 se muestra el esquema de operación de un sistema básico de cocimiento de tres templas.

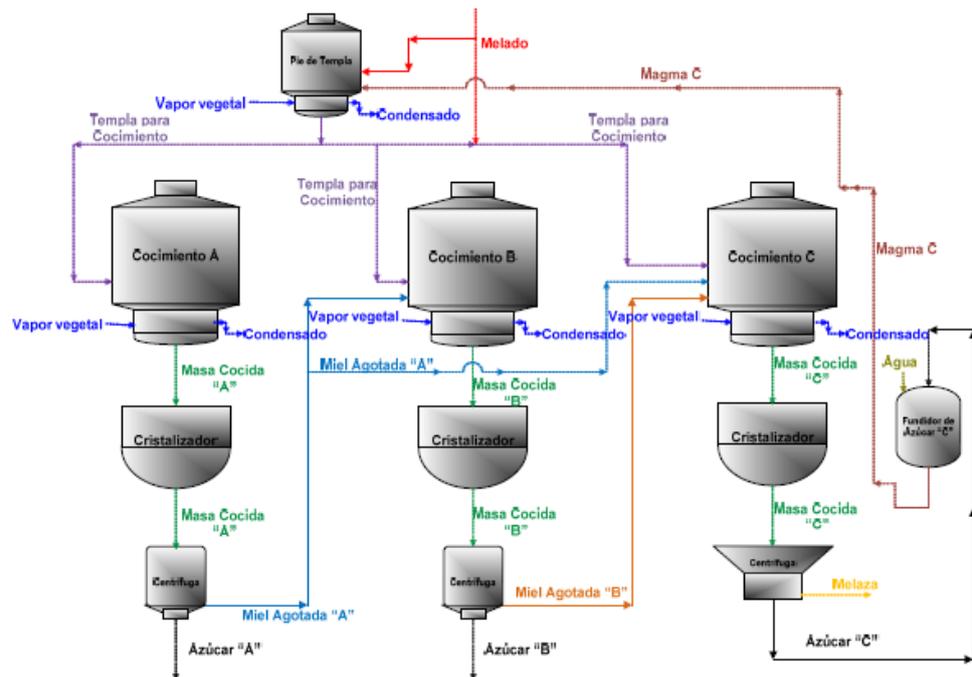


Figura 2. Esquema de operación de un sistema básico de cocimiento de tres templas.

Fuente Golato (2014).

Las mezclas de mieles con las que se alimenta el pie de tempa, cocimiento "A", cocimiento "B" y cocimiento "C" deben tener una concentración inicial de 60-70 °Brix, aproximadamente (Golato, 2014).

2.3.3. Tiempo de proceso de cristalización

Es prácticamente imposible que toda la sacarosa disuelta en la miel madre de una tempa, se deposite sobre el cristal ya formado. A ello se opone la velocidad de cristalización, debido

a la baja pureza de la miel que envuelve al cristal y a la viscosidad que adquiere el licor madre a medida que se acerca a su agotamiento máximo.

El tiempo de tratamiento de las masas cocidas en los cristalizadores variará dependiendo de la naturaleza de los no-azúcares, la pureza y las características y operación de los cristalizadores.

En el Cuadro 1 se muestra los tiempos de operación de un sistema de cocimiento de tres templeas.

Cuadro 1. Tiempos de operación de un sistema de cocimiento de tres templeas

Producto	Pureza aparente inicial (%)	Pureza aparente final (%)	Concentración final	Tiempo de cocción en tachos (h)	Tiempo de enfriamiento en cristalizadores (h)
Masa cocida "A"	84	69	92.5	2	4
Masa cocida "B"	76	57	92.5	3	4
Masa cocida "C"	62	42	92.5	Min 5	16-30
Pie de templa	84	-	89-91	1-2	-

Fuente: Golato (2014).

2.3.4. Principio de funcionamiento de un tacho de cocimiento

Golato (2014) indica que el principio de funcionamiento de un tacho de cocimiento comprende cuatro fases principales:

- Concentración
- Cristalización
- Crecimiento del grano

- Cerrado de la masa cocida

En la primera fase se deja entrar un cierta cantidad de melado al tacho, la misma se encuentra determinada por el volumen del tacho y debe ser lo más pequeño posible, pero lo suficiente para cubrir la calandria interior del mismo, de lo contrario podría haber caramelización durante el proceso de cocción. Cuanto menor es este volumen que se deja entrar, o cuanto menor es el volumen del pie de templa, menor será el número de cristales en la masa cocida final.

A medida que el volumen de la masa cocida disminuye en el tacho (mayor concentración), se debe agregar melado para mantener el líquido a un nivel lo suficientemente alto como para cubrir la superficie de calentamiento y evitar la caramelización y el consiguiente cambio de color de la masa.

En la etapa de cristalización, cuando la sobresaturación llega a un valor determinado, por ejemplo $S=1,40$, correspondiente a la zona lábil, ocurre la cristalización. La misma puede realizarse por medio de la espera de la cristalización espontánea a partir de una concentración del melado de 80 °Bx, o por la inclusión de granos de azúcar en la masa cocida (semillado), esta operación se realiza a través de una válvula de semillado, que posee un diámetro reducido para evitar la aspiración de aire y polvo hacia el interior del tacho.

La operación de apertura de esta válvula debe realizarse lentamente. Una vez finalizada la operación de semillado, se debe limitar el ingreso de vapor al tacho para evitar la posible disolución de los cristales finos en contacto con la superficie caliente. Luego de esperar unos minutos, el cocimiento de la

masa se continúa lentamente para favorecer el crecimiento de cristales de azúcar. Durante este tiempo, no debe agregarse melado virgen, ya que provocaría la dilución de los cristales recientemente formados. Esta operación debe realizarse regulando el vacío hasta alcanzar valores normales de trabajo (alrededor de 60 cmHg).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Lugar de ejecución

Este trabajo de investigación se realizó en la Planta Procesadora de Azúcar y Laboratorio de Control de Calidad del complejo Agroindustrial Casa Grande.

3.2. Materiales, reactivos y equipos

Polarímetro. Marca Rudolph Research Analytical, Modelo Autoplo 589 Automatic Saccharimeter.

Balanza analítica. Marca Mettler Toledo. Capacidad 0-210 g, sensibilidad aprox. 0.0001 mg.

Refractómetro. Marca Rudolph Research, Automatic Refractometer. Rango: 0-90 °Brix, $\pm 0,2\%$, calibrado a 20 °C.

Microscopio Advanced Optical Microscope.

Tensoactivo. ALMER SF-500.

Agente clarificante. Marca Octapol.

3.3. Esquema experimental

En la Figura 3 se presenta el esquema experimental para evaluar el efecto de la pureza de la miel y tiempo de proceso de cristalización por siembra, en la pureza y tamaño de grano durante la elaboración de azúcar rubia.

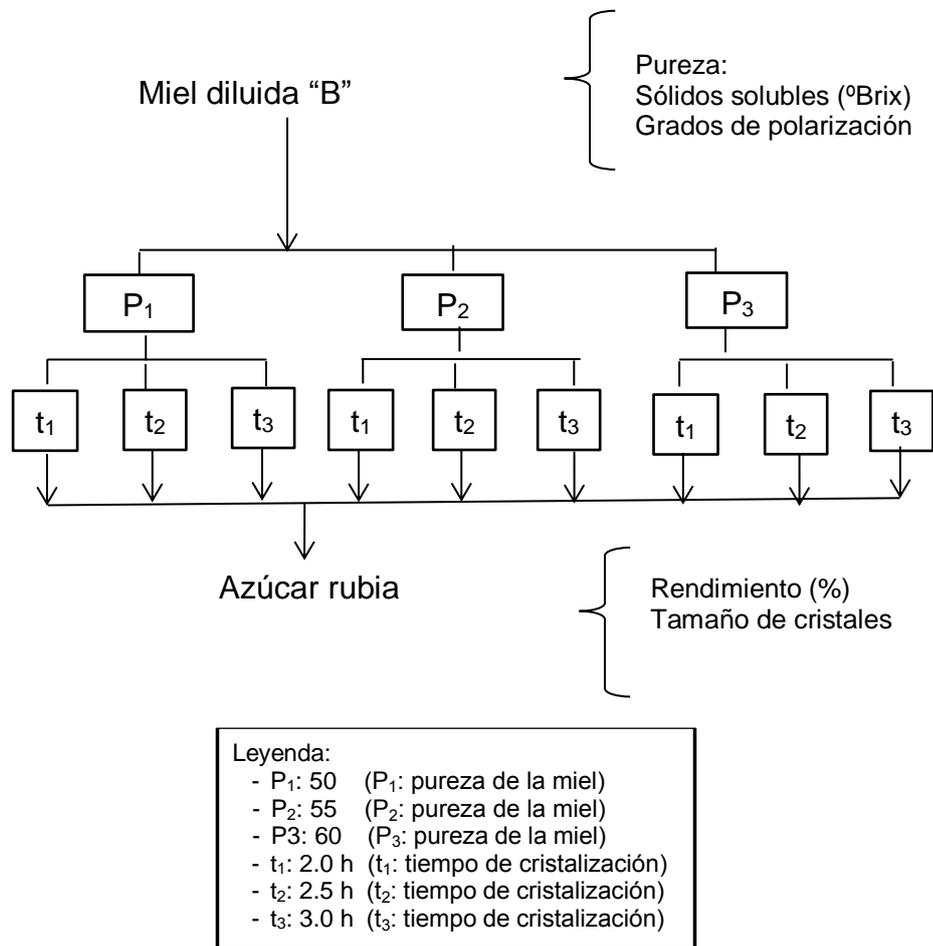


Figura 3. Esquema experimental para la investigación sobre efecto de la pureza de la miel y tiempo de proceso de cristalización.

3.4. Diagrama de flujo de la elaboración de azúcar rubia

En la Figura 4, se presenta el diagrama de flujo de la elaboración de azúcar rubia.

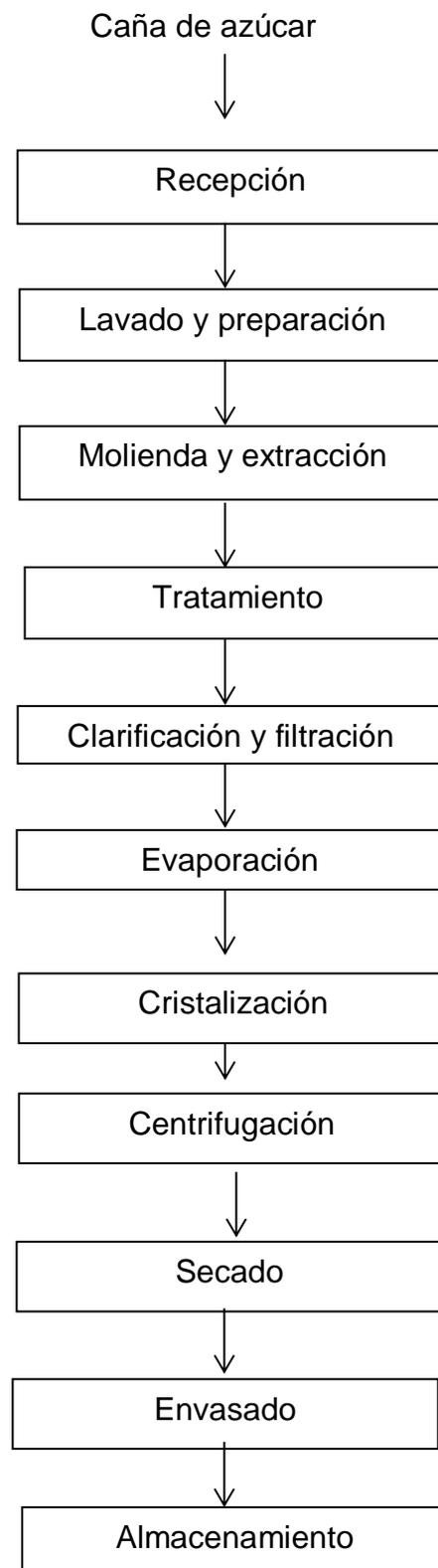


Figura 4. Diagrama de flujo de la elaboración de azúcar rubia.

A continuación, se describe cada operación presentada en el diagrama de flujo de la Figura 3.

Recepción

La caña, en estado de maduración óptima (14 °Brix), fue transportada al ingenio donde fue pesada en una báscula electrónica para luego ser llevada hacia una grúa de descarga tipo hilo y volcar la caña en una mesa alimentadora lavadora.

Lavado y preparación de la caña

Posteriormente, la caña fue descargada en la mesa alimentadora, para ser lavada y descargada en un conductor de tablillas que la llevó a través de una picadora donde fue trozada para posteriormente, a través de un conductor de bandas, atravesar un electroimán y luego alimentar una desfibradora, la cual permitió preparar adecuadamente la caña antes de ser conducida al proceso de molienda.

Molienda y extracción del jugo

El trapiche o circuito de molienda consta de una batería de 6 molinos; la extracción del jugo se realizó por compresión, ayudado por la acción inhibidora del agua añadida entre el 5° y 6° molino.

El jugo extraído fue reciclado al molino anterior, hasta llegar al primer molino donde fue tamizado en filtros rotatorios con el fin de retirar las partículas de bagazo contenidas en el jugo.

Tratamiento del jugo

El jugo mezclado, con un pH cercano a 5.5, proveniente de los filtros rotatorios fue pesado y, luego, pasó a un tanque mezclador

donde se le añadió lechada de cal o sacarato de calcio para alcalinizarlo hasta un pH cercano a 7.4, para evitar la inversión de la sacarosa (pérdidas de azúcar) por efectos del pH ácido del jugo de caña.

El jugo encalado fue calentado en una batería de calentadores verticales o calentadores de placas, con el fin de elevar la temperatura desde 30 °C hasta aproximadamente 105 °C antes de pasar al clarificador.

Clarificación del jugo y filtración de cachaza

El jugo encalado caliente se clarificó por sedimentación, producto de la reacción de la lechada de cal con los fosfatos contenidos en el jugo, a temperaturas promedio de 98 y 105 °C y con tiempos de retención entre 20 y 30 minutos; la decantación de los lodos fue ayudada por agentes floculantes que aceleraron el proceso.

Las impurezas decantadas en el clarificador se denominan cachaza, y fueron evacuadas por la parte inferior del clarificador, mientras que el jugo clarificado fue extraído por la parte superior. La materia sólida depositada en la parte inferior del clarificador fue transportada al filtro de cachaza; la cachaza sólida fue entonces retirada en camiones y utilizada como fertilizante natural.

El jugo que sale del clarificador a una temperatura promedio de 98 °C y con 13-14 °Brix fue bombeado hacia una batería de calentadores de jugo clarificado, con la finalidad de elevar su temperatura a 120 °C, antes de ser sometido al proceso de evaporación.

Evaporación del jugo

La evaporación es el proceso mediante el cual se incrementó la concentración del jugo de 14 a 65 °Brix (sólidos disueltos) esto es

posible gracias al uso de vapor saturado (137 °C) proveniente de las calderas. El sistema de evaporación consta de un sistema de 5 efectos (115, 100, 96, 65 y 55 °C). El uso de múltiples efectos en serie hizo posible reducir la demanda de vapor, por lo cual la mayor parte del agua es evaporada mediante este proceso.

Cristalización

El azúcar A se cristalizó a partir de jarabe con pureza de mayor de 82, utilizando como semilla un magma que consiste en azúcar C en agua con un tiempo de proceso promedio de 2.5 horas.

El azúcar B se cristalizó a partir de miel diluida A con pureza de 65-70, utilizando como semilla el mismo magma de azúcar C con tiempo de proceso promedio de 5.0 horas.

Los cocimientos de masa C se alimentaron con miel diluida B. La masa cocida que abandona el tacho está sobresaturada y caliente, en el rango de 63 a 70 °C. El contenido de cristales es alto, pero aún es posible lograr un agotamiento adicional al enfriar la masa cocida antes de la centrifugación. Mientras la masa cocida se enfría, la velocidad de cristalización se reduce, pero un tiempo suficiente de retención en los cristalizadores por enfriamiento logrará la cristalización adicional deseada. En este proceso se evaluó la pureza (50, 55 y 60) de la miel diluida "B" y tiempo (2.0, 2.5 y 3.0 h) de proceso de cristalización, en el rendimiento y tamaño de cristales en la masa cocida "C", durante la elaboración de azúcar rubia.

Centrifugación

Las masas cocidas A y B se centrifugaron para obtener un azúcar A y B, evaluándose el rendimiento y la pureza de cada una de ellas.

La masa cocida C se centrifugó en máquinas continuas, las que separaron el azúcar C o azúcar de tercera. La miel C o melaza, fue enviada a la destilería para la elaboración de alcohol.

Secado de Azúcar

El secado del cristal se efectuó con aire caliente a 50 °C para retirar la mayor cantidad de humedad posible del azúcar y evitar la aglomeración de cristales, con oclusiones de agua, hasta un 0.1% de humedad residual (Rain, 2012). Posteriormente se enfrió, reduciéndose la humedad hasta 0.03 a 0.05%, originándose una superficie cristalina uniforme, lisa y ausente de polvo. Es precisamente el enfriamiento el proceso que marca la diferencia entre un azúcar altamente brillante y un azúcar opaco (Rain, 2012).

Envasado de Azúcar

El azúcar rubia a granel fue envasado en sacos de 50 kg en presentaciones de Casa Grande o Cartavio dependiendo del mercado.

Almacenamiento

El azúcar envasado se despachó al almacén de producto terminado o a clientes directos para su posterior comercialización.

(Empresa Agroindustrial Casa Grande S. A., 2015).

3.5. Métodos de análisis

3.5.1. Sólidos solubles

Se determinó mediante método refractométrico (AOAC, 1997).

3.5.2. pH

Se determinó mediante método potenciométrico (AOAC 1997).

3.5.3. Grado de polarización

El grado de polarización se determinó pesando 26 g de jugo en una balanza de precisión digital transfiriéndose a un balón aforado boca ancha Kohlraush. Seguidamente se agregó una medida de reactivo clarificante Octapol (3 g), completándose el volumen con agua destilada. Luego se procedió a sellar el balón con un tapón, agitándose por lo menos cinco veces, acto seguido se filtró la muestra de jugo, tratando de pasar todo el contenido del balón al embudo de una sola vez. El filtrado se recibió en un vaso transparente para observar la calidad del mismo. Después de enjuagar las paredes del vaso, se desecharon los primeros mL del filtrado y con el jugo filtrado transparente se llenó el tubo de muestra, el cual fue colocado en el polarímetro. La lectura obtenida correspondió al porcentaje pol en jugo. La temperatura de trabajo en el laboratorio fue de 20 °C (Covenin 237:1994).

$$\% \text{Pureza} = \frac{^{\circ}\text{Pol}}{^{\circ}\text{Brix}} * 100 \quad (1)$$

En los casos en que el porcentaje de pureza sea menor a 75 se procede a realizar inmediatamente un análisis de azúcares reductores (Covenin 237:1994).

3.5.4. Azúcares reductores

El porcentaje de azúcares reductores se determinó por el método gravimétrico Lane Eynon (Covenin 237:1994). Este método se basa en la propiedad que tienen los monosacáridos y otras sustancias presentes en el producto a analizar de reducir el cobre del estado cúprico al cuproso, siendo la cantidad de cobre reducida, proporcional a la cantidad de sustancias reductoras presentes.

Se pesaron 50 g de muestra y se llevó a un matraz de 100 mL, se agitó y enrasó con agua destilada. Se filtró descartando los primeros 25 mL del filtrado.

Se llenó una bureta con el filtrado y se utilizó para titular un matraz que contenía 1 mL de Fehling A, 1 mL de Fehling B y 100 mL de agua destilada, en ebullición. Después de 2 min de ebullición se adicionó 3 gotas de azul de metileno y se procedió la titulación hasta cambio de color de la solución hasta color rojo ladrillo. Se anotó el gasto y se calculó la cantidad de azúcares reductores con la ecuación 2.

$$A(\%) = \frac{22 * 0.005}{V * C}$$

$$A(\%) = \frac{1.00}{V * 50/100}$$

$$A(\%) = \frac{2.00}{V}$$

Donde:

2: Factor de la solución de Fehling

V: Gasto en la titulación (mL)

C: Dilución de la solución azucarada

A: porcentaje de azúcares reductores

3.5.5. Rendimiento de cristales

El rendimiento de cristales se calculó con la ecuación 3 (Rein, 2012).

$$\% \text{Rendimiento cristales} = \frac{(\text{Pureza masa}_c - \text{Pureza miel}_B)}{(100 - \text{Pureza de miel}_B)} * 100 \quad (3)$$

3.5.6. Tamaño de cristal

Para determinar el tamaño del cristal se adicionó 3 gotas de tensoactivo, sobre una luna. Posteriormente se esparció juntando ambas lunas. Una vez preparadas las lunas, se tomó una muestra representativa del tacho de masa cocida C y se esparció la muestra a lo largo y ancho de la luna, de tal modo que quede como una capa fina.

Luego de separar ambas lunas, se llevó al microscopio para su respectivo análisis (Empresa Agroindustrial Casa Grande S. A., 2015).

3.6. Análisis estadístico

El diseño estadístico correspondió a un arreglo factorial 3*3 con 3 repeticiones. A los resultados de la evaluación del rendimiento y tamaño del cristal, se aplicó la Prueba de Levene para evaluar homogeneidad de varianzas. Posteriormente se utilizó un análisis de varianza y finalmente la prueba de comparaciones múltiples de Duncan, todas con un nivel de confianza del 95% (Montgomery, 2011). Se utilizó el programa SPSS para Windows, versión 22.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Caracterización del jugo de caña

En el Cuadro 2 se muestra las características fisicoquímicas del jugo de caña.

Cuadro 2. Características fisicoquímicas del jugo de caña.

Característica	Valor
Sólidos solubles (°Brix)	19.73±1.36
Pol (%)	17.11±0.79
Azúcares reductores (%)	0.77±0.25
Pureza (%)	86.62±1.94
pH	5.18±0.06

El valor de sólidos solubles fue mayor al reportado por Solís-Fuentes y otros (2010) (19.13 °Brix) y Hernández (2014) (19.00 °Brix). El valor de pH fue mayor al encontrado por Solís-Fuentes y otros (2010) (4.88) y Hernández (2014) (4.92); el porcentaje de azúcares reductores fue mayor al encontrado por Solís-Fuentes y otros (2010) (0.38%); la pureza fue menor al encontrado por Solís-Fuentes y otros (2010) (87.10) para jugo de caña de primera extracción.

4.2. Rendimiento de cristales en la masa cocida "C", durante la elaboración de azúcar rubia

El rendimiento de cristales en la masa cocida "C" durante la elaboración de azúcar rubia se presenta en la Figura 5. Estos resultados fueron mayores a los reportados por Madrid (2013), quien reporto valores entre 31% a 39%, para pureza de miel "B"

entre 32 a 41, posiblemente debido a los mayores valores de pureza evaluados (50, 55 y 60).

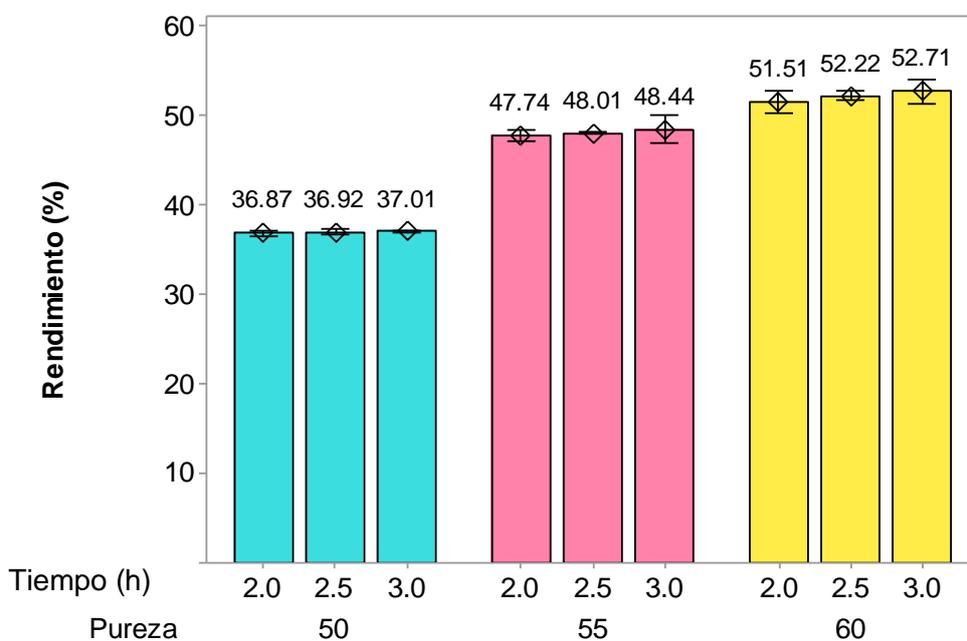


Figura 5. El rendimiento de cristales en la masa cocida "C".

En el Cuadro 3, se muestra la prueba de Levene modificada para los valores de rendimiento de cristales en la masa cocida "C" durante la elaboración de azúcar rubia; observándose homogeneidad de varianzas ($p > 0.05$) por tanto, se procedió a realizar el análisis de varianza.

Cuadro 3. Prueba de Levene modificada para valores de rendimiento de cristales en la masa cocida "C"

Variable	Estadístico de Levene	p
Rendimiento	0.580	0.782

En el Cuadro 4 se observa el análisis de varianza para valores de rendimiento de cristales en la masa cocida “C” durante la elaboración de azúcar rubia, el cual muestra que la pureza de la miel diluida “B” y tiempo de proceso de cristalización presentaron efecto significativo ($p < 0.05$) sobre la variable estudiada.

Arca y otros (2000) indican que el tamaño y rendimiento de cristales de sacarosa está en función de la pureza de la miel diluida “B” y tiempo de proceso de cristalización, el cual puede incrementarse o reducirse, dependiendo del volumen de la masa cocida “B”, contenido de cenizas y tipo de cristalizador.

Cuadro 4. Análisis de varianza para valores de rendimiento de cristales en la masa cocida “C”

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	p
Pureza	1115.808	2	557.904	3977.693	0.000
Tiempo de proceso	2.090	2	1.045	7.452	0.003
Error	3.086	22	0.140		
Total	1120.984	26			

En el Cuadro 5, se muestra la prueba de comparaciones múltiples de Duncan, donde se pudo apreciar que existió diferencia significativa entre los tratamientos denotado por la formación de subgrupos.

Cuadro 5. Prueba de Duncan para valores de rendimiento de cristales en la masa cocida "C"

Pureza	Tiempo (h)	Subgrupo				
		1	2	3	4	5
50	2.0	36.87				
50	2.5	36.92				
50	3.0	37.01				
55	2.0		47.74			
55	2.5		48.01	48.01		
55	3.0			48.44		
60	2.0				51.51	
60	2.5					52.22
60	3.0					52.71

Tal como se observa, los tratamientos con mayor pureza y mayor tiempo de proceso de cristalización presentaron mayor rendimiento de cristales.

Pérez (2013) comparó dos tecnologías de cristalizadores continuos que se relacionan directamente con la masa tercera del lado crudo, para determinar si existe un mejor agotamiento de sacarosa es decir, una mayor recuperación. Para tal fin se realizó un análisis para determinar la pureza de la masa tercera y miel final tanto en cosecha 2011-2012 como 2012- 2013 a lo largo de 40 días y a partir de ahí analizar las distintas reducciones de sacarosa tanto en masa tercera como miel final y comparar la pureza en masa tercera y miel final, la caída de pureza de masas tercera a miel final, cuantificar el contenido de cristales recuperados y cuantificar el agotamiento de miel. Se obtuvieron valores a lo largo del tiempo que demostraron las variaciones que se pueden presentar en los resultados, es decir la masa tercera, miel final y cristalización no presentan

características exactamente iguales diariamente. El proceso se vio afectado desde la calidad de los equipos donde se realiza la cristalización, distinto operador y se refleja en los parámetros de la masa tercera, como en el contenido de cristales.

Madrid (2013) comparó la reducción de sacarosa en masa tercera y miel final a través una tecnología nueva de cristalizadores con circulación forzada, con respecto a la tecnología de cristalizadores continuos para el área de fabricación en un ingenio azucarero. Para ello compararon la pureza de la miel final y masa tercera obtenida con la anterior tecnología utilizada con los valores encontrados aplicando la nueva tecnología. Cuantificaron las diferencias porcentuales de pureza y caída porcentual de pureza entre masas a mieles finales en ambas tecnologías, el contenido de cristales recuperados y el agotamiento de miel. Encontraron una reducción de sacarosa y una reducción de pureza en masa tercera y miel final en dos cosechas distintas con dos tecnologías diferentes de cristalizadores continuos, así como que las caídas de pureza no tuvieron un cambio significativo.

4.3. Tamaño de cristales en la masa cocida "C", durante la elaboración de azúcar rubia

Los valores de tamaño de cristales en la masa cocida "C", durante la elaboración de azúcar rubia se presenta en la Figura 6, observándose una relación directa entre la pureza de la miel y el tiempo de proceso de cristalización con el tamaño de cristales, los cuales variaron entre 0.277 y 0.389 μm .

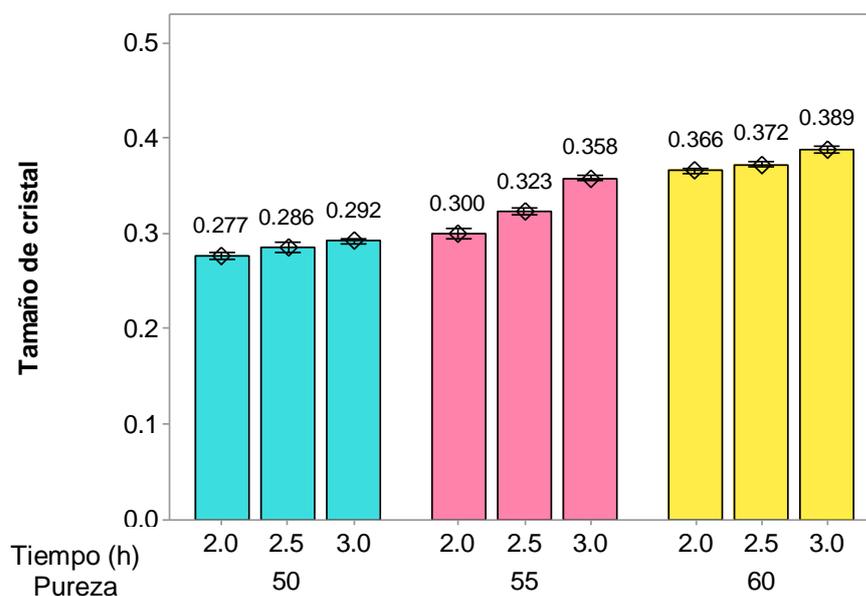


Figura 6. Tamaño del cristal de sacarosa en función a la pureza y tiempo de cristalización.

Estos valores concuerdan con los reportados por Arca y otros (2000), quienes indican que el tamaño adecuado de cristales de masa cocida C, deben estar comprendidos entre 0.35-0.40 cm.

En el Cuadro 6, se muestra la prueba de Levene modificada para los valores de tamaño de cristales en la masa cocida “C” durante la elaboración de azúcar rubia; observándose homogeneidad de varianzas ($p > 0.05$) por tanto, se procedió a realizar el análisis de varianza.

Cuadro 6. Prueba de Levene modificada para tamaño de cristales en la masa cocida “C” durante la elaboración de azúcar rubia

Variable	Estadístico de Levene	p
Tamaño del cristal	0.330	0.942

En el Cuadro 7, se observa el análisis de varianza para valores de tamaño de cristales en la masa cocida “C” durante la elaboración de azúcar rubia.

Cuadro 7. Análisis de varianza para tamaño del cristal de sacarosa

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Media cuadrática	F	p
Pureza	0.037	2	0.019	242.438	0.000
Tiempo de proceso	0.005	2	0.002	30.576	0.000
Error	0.002	22	0.000		
Total	0.044	26			

Tal como se muestra, la pureza de la miel diluida “B” y tiempo de proceso de cristalización presentaron efecto significativo ($p < 0.05$) sobre la variable estudiada.

Estos resultados concuerdan con la investigación realizada por Lodos y otros (2007) quienes informaron que la pérdida de azúcar en la miel final es el mayor problema de eficiencia que tiene la producción azucarera. Indican que en los últimos años la pureza de la miel final se ha estabilizado en 40 % y aparentemente, se ha llegado a un valor que no puede reducirse más, sin cambiar sustancialmente algún elemento del proceso. Señalan que elevados valores de sólidos solubles y viscosidad del licor se asocia a un menor tamaño de los cristales en la masa cocida. Observaron que el incremento de la cantidad del medio de semillamiento usado, provoca la reducción del tamaño de los cristales y es insuficiente para explicar dichos valores. Adicionalmente, los resultados obtenidos indican que el tamaño

de los cristales generados es afectado por el tipo de fragmentación del cristal-semilla y tipo de centrifuga empleado.

En el Cuadro 8, se muestra la prueba de comparaciones múltiples de Duncan, donde se pudo apreciar que existió diferencia significativa entre los tratamientos denotado por la formación de subgrupos, indicando mayor tamaño del cristal en el tratamiento 9 (pureza: 60 y tiempo de cristalización 3.0 h).

Cuadro 8. Prueba de Duncan para tamaño de cristal de sacarosa

Pureza	Tiempo (h)	Subgrupo								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
50	2.0	0.277								
50	2.5		0.286							
50	3.0			0.292						
55	2.0				0.300					
55	2.5					0.323				
55	3.0						0.358			
60	2.0							0.366		
60	2.5								0.372	
60	3.0									0.389

Páez (2013) evaluó parámetros en el proceso de cristalización que influyen el tamaño del grano. Además hizo énfasis en los distintos procedimientos y técnicas para determinar el tamaño de grano en producto de azúcar turbinado y del material que proviene del cristalizador (masa primera). Para realizar el procedimiento se deben tener en cuenta las características de la semilla, su pureza que debe estar entre 90 y 94% y tamaño de

grano aproximado de 400 micras. Se debe evaluar la meladura a usar y es indispensable controlar las diferentes variables de temperatura, presión de vacío, presión de vapor, agitación del sistema y tiempos de permanencia. Después del tiempo determinado según el tamaño de grano deseado se realiza un corte de masa y se procede a aumentar el tamaño de grano según especificaciones de la empresa (700- 900 μm).

V. CONCLUSIONES

Se determinó efecto significativo de la pureza de la miel diluida "B" y tiempo de proceso de cristalización, en el tamaño de cristales en la masa cocida "C", durante la elaboración de azúcar rubia; encontrándose una relación directamente proporcional.

El tratamiento con pureza de la miel diluida "B" de 60 y tiempo de 3.0 h en el proceso de cristalización reportó mayor rendimiento (52.71%) de cristales en la masa cocida "C" y mayor tamaño del cristales (0.389 μm).

VI. RECOMENDACION

Realizar estudios sobre efecto del tipo de centrífuga (continua o discontinua) en el rendimiento y tamaño de cristales durante la elaboración de azúcar rubia.

VII. BIBLIOGRAFÍA

Arca, M., Esparza, R. y Arca, C. 2000. Haciendo azúcar. Cristalizadores y magma. República Dominicana: Acra Corporation, 64 p.

Empresa Agroindustrial Casa Grande S. A. A. 2015. Manual HACCP para producción de azúcar.

Chen, J. 1991. Manual del azúcar de caña: para fabricantes de azúcar de caña y químicos especializados. Cuarta ed. México: Limusa.

Covenin 237:1994. Comisión Venezolana de Normas Industriales. Azúcar. Determinación de la polarización.

Covenin 3107: 1994. Comisión Venezolana de Normas Industriales. Azúcar. Determinación de azúcares reductores.

Dominguez, G. 2013. Normalización del tamaño del cristal de azúcar en el proceso azucarero a través del desarrollo sustentable aplicado al balance energético. Informe de tesis para obtener el grado de maestro en Tecnología Avanzada.: Instituto Politécnico Nacional. Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología Avanzada, Unidad Altamira. México, 92 p.

Disponible en: <http://itzamna.bnct.ipn.mx/dspace/handle/123456789/11923>.

Fecha de consulta: 13 de junio 2015.

Golato, M. 2014. Sistema de control de cocimiento de azúcar. Universidad Nacional de Tucumán, Argentina: 27 p.

González, L. 2013. Diseño de la investigación del aumento en producción de azúcar refino aplicando metodología de semillamiento en un tacho tipo batch, Informe de Tesis para obtener el título de Ingeniero Electrónico. Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Universidad San Carlos de Guatemala, Guatemala, 68 p.

Disponible en: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0326_EO.pdf.
Fecha de consulta: 23 junio 2015.

Hernández, Y. 2014. Elaboración de panela blanca a partir de jugo de caña purificado con carbón activado de bagazo y ultrafiltración. Informe de Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico. Universidad Veracruzana: Escuela de Ingeniería Química, Mexico, 75 p.

Huaca, A. 2016. Optimización del proceso de cristalización de la sacarosa para un agotamiento máximo de la miel final y una producción homogénea de cristales en el Ingenio Azucarero del Norte CEM. Informe de Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico. Universidad Veracruzana: Escuela de Politecnica Nacional, Quito, Ecuador: 131 p.

Lodos, J.; Rodriguez, M. y Rostgaard, O. 2007. Las pérdidas en mieles y la medición del tamaño de los cristales de azúcar. Revista de la Asociación de Técnicos Azucareros de Cuba, 1:18-22.

Disponible en: <http://www.actaf.co.cu/revistas/ATAC/ATAC1-2007/04mieles.pdf>. Fecha de consulta: 12 de julio 2015.

Madrid, E. 2013. Análisis comparativo del agotamiento de sacarosa en masa tercera entre dos tecnologías diferentes de cristalizadores continuos en el área de fabricación en un ingenio azucarero. Informe de Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico. Escuela de Ingeniería Química, Universidad San Carlos de Guatemala, Guatemala, 68 p.

Disponible en: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1342_Q.pdf. Fecha de consulta: 28 agosto 2015.

Montgomery, D. 2011. Diseño y Análisis de Experimentos. Editorial Limusa-Wiley. 2da Edición. México.

Páez, C. 2013. Determinación de las condiciones óptimas para la producción de azúcar turbinado en los parámetros color y tamaño de grano en la empresa Ingenio Risaralda S.A. Informe de Tesis para obtener el

título de Químico Industrial. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnología, Pereira, Colombia, 121 p.

Disponible en: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/11059/3835/1/664122P127.pdf>. Fecha de consulta: 23 agosto 2015.

Pérez, E. 2013. Analisis Comparativo del agotamiento de sacarosa en masa de tercera entre dos tecnologías de cristalizadores continuos en el área de fabricación de un ingenio azucarero. Informe de Tesis para obtener el título de Ingeniero Químico. Escuela de Ingeniería Química, Universidad San Carlos de Guatemala, Guatemala, 113 p.

Disponible en: http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_1342_Q.pdf. Fecha de consulta: 20 agosto 2015.

Rein, P. 2012. Ingeniería de la caña de azúcar, Berlín, Alemania: Elbe Druckerei Wittenberg.

Solís-Fuentes, J. A., Calleja-Zurita, K. y Durán-de-Bazúa, M. 2010. Desarrollo de jarabes fructosados de caña de azúcar a partir del guarapo. Tecnología, Ciencia y Educación, 25(1):53-62.

ANEXOS

Anexo 1. Características del jugo de caña

PRIMER JUGO T1					
Descripción	% Brix	% Pol	% Pur	% Red	pH
R1	21.21	17.95	84.64	1.05	5.11
R2	19.43	16.99	87.44	0.72	5.22
R3	18.54	16.38	88.37	0.55	5.22
Promedio	19.73	17.11	86.82	0.77	5.18
Desviación estándar	1.36	0.79	1.94	0.25	0.06

Anexo 2. Características de la miel diluida "B"

MIEL "B" DILUIDA Pureza 50.28±0.15			
Descripción	% Brix	% Pol	% Pur.
R1	72.66	36.46	50.18
R2	73.50	36.79	50.06
R3	65.22	32.84	50.35
MIEL DILUÍDA "B" Pureza 55.28±0.78			
Descripción	% Brix	% Pol	% Pur.
R1	67.38	37.21	55.22
R2	67.14	36.61	54.53
R3	75.06	42.10	56.09
MIEL "B" DILUIDA Pureza 60.03±1.08			
Descripción	% Brix	% Pol	% Pur.
R1	71.58	42.559	59.46
R2	73.38	43.558	59.36
R3	71.46	43.79	61.28

Anexo 3. Rendimiento y tamaño de cristales de sacarosa para pureza 50
de miel diluida "B"

Descripción	Tiempo de proceso 2 h			Tiempo de proceso 2.5 h			Tiempo de proceso 3 h		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
Rendimiento %	36.78	36.82	37.01	36.79	37.02	36.96	37.04	36.97	37.02
Tamaño de cristal μm	0.275	0.278	0.277	0.283	0.286	0.288	0.291	0.293	0.292

Anexo 3. Rendimiento y tamaño de cristales de sacarosa para pureza 55
de miel diluida "B"

	Tiempo de proceso 2 h			Tiempo de proceso 2.5 h			Tiempo de proceso 3 h		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
Rendimiento %	47.55	47.65	48.02	48.05	47.98	48.01	49.2	48.07	48.05
Tamaño de cristal μm	0.298	0.302	0.299	0.322	0.325	0.323	0.357	0.359	0.358

Anexo 4. Rendimiento y tamaño de cristales de sacarosa para pureza 60
de miel diluida "B"

	Tiempo de proceso 2 h			Tiempo de proceso 2.5 h			Tiempo de proceso 3 h		
	R1	R2	R3	R1	R2	R3	R1	R2	R3
Rendimiento %	51.4	52.04	51.086	52.06	52.13	52.46	53.01	52.09	53.04
Tamaño de cristal μm	0.365	0.367	0.366	0.371	0.373	0.373	0.387	0.389	0.39