

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

Mejoramiento del proceso de producción de panela orgánica en unidades
paneleras de la provincia de Cotopaxi

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero en alimentos

Presentado por:

María de los Ángeles Garófalo Chuchuca

Pedro Fernando Villón Salinas

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2019

DEDICATORIA

El presente proyecto lo dedico a Dios y a mis padres Leandro y Emperatriz, ellos han sido la razón por la que me propuse esta meta de estudio, es un privilegio poder honrarlos de esta forma.

Pedro Fernando Villón Salinas

Este proyecto lo dedico a mis padres por su apoyo constante durante toda mi etapa de estudio y por ayudarme a cumplir esta meta.

**María de los Ángeles Garófalo
Chuchuca**

AGRADECIMIENTOS

Más vale adquirir sabiduría que oro; más vale adquirir inteligencia que plata. Proverbios 16:16.

Agradezco a Dios la oportunidad de haber llegado hasta este nivel importante en mi vida, por brindarme fortaleza y sabiduría. A mis padres por enseñarme que con esfuerzo se logra alcanzar muchos objetivos. Agradezco a mis maestros de estudio por cada aprendizaje brindado, y a mi amiga y compañera de trabajo María de los Ángeles.

Pedro Fernando Villón Salinas

Agradezco a Dios que a pesar de las dificultades he conseguido salir adelante con su ayuda. A mis padres por su comprensión y apoyo en cada momento difícil. Agradezco a mis maestros por toda la enseñanza recibida.

**María de los Ángeles Garófalo
Chuchuca**

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *María de los Ángeles Garófalo Chuchuca* y *Pedro Fernando Villón Salinas* y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual"

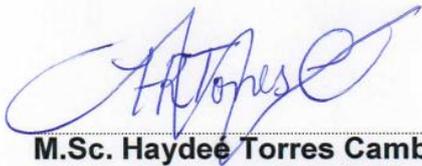


María de los Ángeles
Garófalo Chuchuca



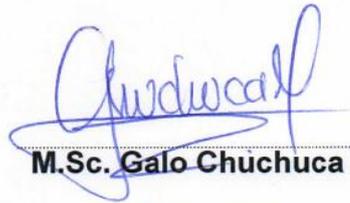
Pedro Fernando Villón
Salinas

EVALUADORES



M.Sc. Haydee Torres Camba

PROFESOR DE LA MATERIA



M.Sc. Galo Chuchuca Morán

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

Las unidades paneleras de Palo Quemado, Cotopaxi producen panela orgánica granulada, comercializando su producto al mercado europeo. Sin embargo, su producción no está estandarizada y su producto presenta niveles de acrilamida mayores al límite establecido por el mercado europeo. Por este motivo, este trabajo tiene como objetivo mejorar el proceso de producción, estandarizando cada etapa y determinando los parámetros de control que reduzcan el contenido de acrilamida para cumplir con los requisitos del mercado europeo.

Luego de definir un proceso estandarizado y controlando los parámetros de proceso durante los tratamientos térmicos, se definió el tipo de aglutinante y control de pH del jugo de caña como medidas preventivas para minimizar el riesgo de formación de acrilamida en la panela. Se evaluaron cuatro tratamientos: pH de jugo de 5.5 y 6.0, y sábila o balso como método aglutinante. Los niveles de acrilamida, las propiedades y composición del producto se determinaron según métodos oficiales y normativas nacionales e internacionales.

Los resultados indican que el acondicionamiento del jugo de caña a pH 5.5 y 6.0, y el uso de sábila, junto con el procesamiento térmico controlado, garantizan niveles de acrilamida $<800 \mu\text{g}/\text{kg}$, cumpliendo con los requisitos del mercado. Además, se observó un efecto significativo del tipo de aglutinante sobre los °Brix y el color del producto, así como un efecto sobre el contenido mineral del producto debido al uso de carbonato de calcio para regular el pH. De esta manera, los tratamientos analizados cumplieron los requisitos de la norma NTE INEN 2 332.

Palabras Clave: Panela granulada, Acrilamida, Jugo de caña, Aglutinante.

ABSTRACT

Palo Quemado's artisanal sugarcane mills in Cotopaxi produce granulated organic non centrifugal cane sugar (panela), selling their product to the European market. However, its production is not standardized and the product shows levels of acrylamide higher than the limit established by the European market. For this reason, this work aims to improve the production process, standardizing each stage, and determine the control parameters to reduce the acrylamide levels in the product in order to comply the requirements of the European market.

After defining a standardized process and controlling the parameters of the process during heat treatments, pH of cane juice and the type of clarifying agent were defined as preventive measures to minimize the acrylamide formation in panela. Four treatments were evaluated: juice pH 5.5 and 6.0, and Aloe Vera or Helicarpus popayanensis (balso) as a clarifying agent. Analysis of acrylamide levels, properties and composition of the product were carried out according to national and international official norms.

The results indicate that the conditioning of cane juice to pH 5.5 and 6.0 as well as the use of Aloe vera, guarantee acrylamide levels in panela (<800 µg/kg), fulfilling the market requirements. Furthermore, a significant effect of the type of clarifying on the Brix and the color of the product was observed, as well as an effect on the mineral content of the product due to the use of calcium carbonate to regulate the pH. Thus, the treatments analyzed met the requirements of the NTE INEN 2 332 standard.

Keywords: Non centrifugal cane sugar, Acrylamide, cane juice, clarifying agent.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	IX
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción.....	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación del problema	1
1.3 Objetivos	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos Específicos.....	2
1.4 Marco teórico	2
1.4.1 Caña Panelera.....	2
1.4.2 Panela Granulada.....	3
1.4.3 Proceso de elaboración de panela granulada	3
1.4.4 La acrilamida en los alimentos.....	6
CAPÍTULO 2.....	9
2. Metodología.....	9
2.1 Materiales	9
2.1.1 Preparación de soluciones.....	9
2.2 Proceso de elaboración de panela granulada.....	10

2.2.1	Extracción y acondicionamiento del jugo de caña	10
2.2.2	Clarificación de jugo.....	10
2.2.3	Evaporación del jugo	10
2.2.4	Concentración, punteo y batido	10
2.2.5	Tamizado y empackado.....	11
2.3	Diseño experimental.....	12
2.4	Caracterización fisicoquímica del jugo de caña	12
2.4.1	Determinación del pH	12
2.4.2	Determinación de sólidos solubles.....	12
2.5	Propiedades y composición de panela granulada	13
2.5.1	Determinación del pH	13
2.5.2	Determinación de sólidos solubles.....	13
2.5.3	Determinación del color	13
2.5.4	Determinación del contenido de humedad	14
2.5.5	Determinación de cenizas totales	15
2.5.6	Determinación de azúcares reductores.....	15
2.5.7	Cuantificación del contenido de acrilamida	16
2.6	Análisis estadístico.....	16
2.7	Propuesta de solución en las unidades paneleras.....	16
2.7.1	Estimación de costos	16
CAPÍTULO 3.....		17
3.	Resultados y análisis.....	17
3.1	Caracterización fisicoquímica del jugo de caña	17
3.2	Propiedades y composición de panela granulada	17
3.3	Diagrama del proceso de elaboración de panela granulada.....	23
3.4	Análisis de costos.....	25
CAPÍTULO 4.....		27

4.	Conclusiones Y Recomendaciones	27
4.1	Conclusiones.....	27
4.2	Recomendaciones.....	27

BIBLIOGRAFÍA

APÉNDICES

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ICUMSA	International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis
INEC	Instituto Nacional de Estadísticas y Censos
UE	Unión Europea
ADN	Acido Desoxirribonucleico
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
HACCP	Hazard Analysis and Critical Control Points
PC	Punto de control
PCC	Punto crítico de control
BOPP	Polipropileno Bi-orientado
NTE	Normativa Técnica Ecuatoriana
INEN	Servicio Ecuatoriano de Normalización
ISO	International Organization for Standardization
NMX-F	Normativas Mexicanas para alimentos
RGB	Modelo de Color Red-Green-Blue
AOAC	Association of Official Analytical Chemists
ANOVA	Análisis de varianza
IC	Intervalo de confianza
MP	Materia prima
IVA	Impuesto al valor agregado
UMB	Unidad de medida base
PP	Polipropileno
MOD	Mano de obra directa
EE	Energía eléctrica
PVP	Precio de venta al público

SIMBOLOGÍA

pH	Potencial de Hidrógeno
ppm	Partes por millón
µg	Microgramo
kg	kilogramo
%	Porcentaje
°Brix	Grados brix
°C	Grados Celsius
kDa	KiloDalton
g	Gramos
m	Metros
psi	Libra de fuerza por pulgada cuadrada
<	Menor a
Pt.	Punto
ml	Mililitro
K	Kelvin
nm	Nanómetro
±	Más menos
>	Mayor a
\$	Dólar
m ³	Metro cubico
und	Unidad
Kw/h	Kilovatio por hora

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Ubicación de partes de la caña para muestreo en la cosecha.....	4
Figura 1.2. Esquema de Proceso Térmico	5
Figura 1.3. Diagrama de proceso de producción de panela	6
Figura 1.4. Mecanismo de formación de acrilamida.	7
Figura 2.1. Diagrama del proceso de panela granulada en el laboratorio	11
Figura 3.1. Gráfica de efectos principales de °Brix	19
Figura 3.2. Gráfica de interacción de cenizas	20
Figura 3.3. Efectos principales. A) Media de L*, B) Media de a*, C) Media de b*, D) Media de ICUMSA.	22
Figura 3.4. Diagrama del proceso de elaboración de panela granulada	24

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Diseño factorial completo	12
Tabla 3.1. pH y °Brix del jugo de caña utilizado en los tratamientos	17
Tabla 3.2. Caracterización de panela granulada.	18
Tabla 3.3. Resultados de determinación de color por tratamiento	21
Tabla 3.4. Correlaciones en parejas de Pearson para variables de color	23
Tabla 3.5. Balance de materia prima	25
Tabla 3.6 Costos de materia prima.....	25
Tabla 3.7. Obtención de Punto de equilibrio	26

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

El jugo de caña de azúcar es la principal materia prima en el procesamiento de panela granulada. Este jugo contiene naturalmente azúcares reductores y aminoácidos como la asparagina, los cuales son precursores de la acrilamida durante el procesamiento de la panela. La Autoridad Europea de Seguridad Alimentaria (EFSA, por sus siglas en inglés) ha verificado que este compuesto puede aumentar el riesgo de contraer cáncer en los consumidores (Reglamento (UE) 2017/2158, 2017); por consiguiente, estima niveles referenciales en productos alimenticios, por ejemplo, papas fritas listas para consumir (500 µg/kg), café instantáneo soluble (850 µg/kg), entre otros. En la provincia de Cotopaxi, diferentes núcleos familiares de las zonas rurales producen panela orgánica granulada y al granel. Mediante una fundación en Quito, el producto se exporta al mercado europeo.

1.1 Descripción del problema

Las unidades paneleras de la comunidad Palo Quemado en la provincia de Cotopaxi comercializan su producto, panela granulada orgánica, en el mercado alemán, no obstante, los importadores europeos objetaron el producto por contener elevados niveles de acrilamida (alrededor de 1200 ppm de producto), que es un carcinógeno sospechoso y, por ende, pone en riesgo la salud humana. Por ello, los compradores demandan un nivel máximo permitido menor a 800 µg/kg.

La formación natural de acrilamida se favorece durante la evaporación del jugo de caña a altas temperaturas. Sin embargo, las unidades paneleras no controlan adecuadamente este punto crítico en el proceso, generando inconformidades en el producto final. Esto ha creado una inestabilidad económica en los productores ante el peligro de perder clientes en el mercado europeo.

1.2 Justificación del problema

En la última década, diversas organizaciones del país han impulsado el crecimiento de los pequeños productores ecuatorianos mediante una ética sostenible y el

comercio justo, convirtiéndolos en participantes activos en el mercado internacional.

Adicionalmente, hay un segmento de mercado que consume frecuentemente la panela como un edulcorante natural. Este interés en la panela se debe a su contenido de minerales, vitaminas, aminoácidos y antioxidantes (Jaffé, 2015). Para algunos consumidores, la panela es una alternativa más saludable que la azúcar refinada u otros edulcorantes artificiales.

En este contexto, este proyecto busca mejorar el proceso de elaboración de panela granulada y obtener un producto que cumpla con el requerimiento exigido por el mercado europeo para su exportación. La producción adecuada de la panela granulada permitirá no solo asegurar la estabilidad económica de estos productores, sino también ofrecer un producto inocuo y de calidad que permita la apertura a nuevos mercados internacionales.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Mejorar el proceso de producción de panela orgánica, mediante la determinación de sus parámetros de control, para el cumplimiento de los requisitos de este producto en el mercado europeo.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Determinar los parámetros de proceso de producción de panela orgánica que minimicen la formación de acrilamida en el producto.
2. Estandarizar las etapas del proceso de producción de panela orgánica en las unidades paneleras de Cotopaxi, para cumplir con requerimiento del cliente.
3. Calcular el costo de la mejora del proceso de producción de panela orgánica, evaluando su factibilidad en las unidades paneleras.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Caña Panelera

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum L.*) es uno de los cultivos más importantes a nivel mundial en regiones tropicales debido a su uso en la

producción de azúcar, un endulzante muy popular entre consumidores y la industria de alimentos.

Este cultivo se produce en más de 130 países, siendo Brasil el mayor productor con el 28% de la producción total (Ibarra González et al., 2018). En el Ecuador se cosecharon 7.3 millones de toneladas en el año 2012 para producción de azúcar (INEC, 2012). El periodo de crecimiento va entre los 11-17 meses y su altura varía entre 2 a 6 m (Castillo, 2018).

El fruto agrícola de la caña de azúcar es su tallo, cuyo diámetro está entre 2 a 4 cm segmentado por varios nudos. El extracto de caña de azúcar es un líquido viscoso, de color marrón o verde opaco, con una excelente fuente de compuestos orgánicos, principalmente azúcares, y la calidad nutritiva puede ser alterada durante el procesamiento o refinado del producto (Iqbal et al., 2017).

1.4.2 Panela Granulada

La panela es un alimento sólido granulado con gran poder edulcorante y energético, que se obtiene a partir de la cristalización del jugo de caña panelera. La panela granulada es una presentación con consumo potencial debido a su fácil dosificación, mayor estabilidad de almacenamiento y mayor solubilidad (Virginia Mujica, Guerra, & Soto, 2008).

A diferencia del azúcar común, la panela aún no ha sido refinada, por lo cual es rica en vitaminas y minerales como hierro, calcio, fósforo, cobre y magnesio, cuyas cantidades en el producto depende de la variedad, estado de madurez y tipo de suelo de la caña de azúcar (Jaffé, 2015). Así mismo, la panela es un producto bioactivo con actividad antioxidante debido a los compuestos fenólicos y flavonoides provenientes del jugo de caña de azúcar (Asikin et al., 2015; Iqbal et al., 2017).

1.4.3 Proceso de elaboración de panela granulada

Luego de alcanzar su estado de maduración, la caña panelera presenta una coloración púrpura en su tallo como indicativo, además, para conocer el índice de madurez de la caña se toma medidas de grados brix en su parte basal y terminal como se muestra en la Figura 1.1 y se utiliza la ecuación 1.1 (Silva Cardoza, 2013). Se recomienda almacenar la caña hasta por cinco días para evitar la deshidratación de la caña o prevenir su fermentación (Mosquera, Carrera, & Villada, 2007).

Índice de Madurez

$$= \frac{\text{Promedio } ^\circ\text{Brix de parte terminal}}{\text{Promedio } ^\circ\text{Brix de parte basal}} \quad (1.1)$$

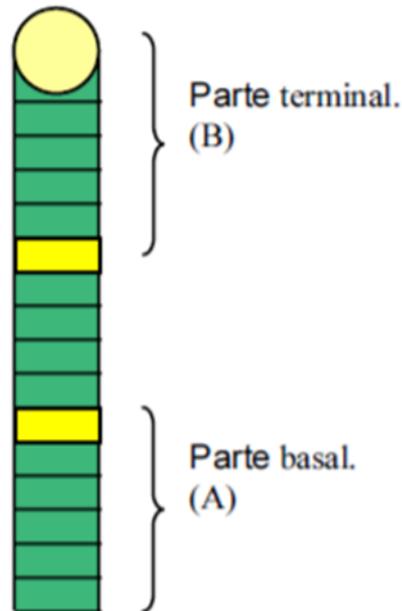


Figura 1.1. Ubicación de partes de la caña para muestreo en la cosecha (Mosquera, Carrera, & Villada, 2007).

A continuación, la caña se hace pasar por un trapiche o molino para obtener su jugo. El pH óptimo del jugo de caña debe ser entre 5.6 a 5.8 para obtener panela con buena calidad según lo recomendado por Mosquera et al. (2007). El jugo de caña posteriormente pasa por tamices con la finalidad de filtrar los sólidos insolubles previo a las tres etapas básicas en el procesamiento para la obtención de panela.

En la primera etapa, la clarificación, el jugo de caña se calienta a temperaturas menores a 90°C, adicionando un agente aglutinante, por ejemplo, sábila, mucílago de balsa o de cadillo, que atrapa impurezas y sustancias coloidales conocidos como cachaza. Estos sólidos se retiran de la solución por medio de cucharas de aluminio (Prada, García, & Chaves, 2015). Posteriormente si el jugo está acidificado se agrega concentraciones determinadas de cal de grado alimenticio para elevar el pH (Mosquera et al., 2007).

Durante la evaporación, segunda etapa, el jugo de caña se concentra a temperaturas mayores a los 100°C hasta que se haya alcanzado la concentración

de sólidos solubles entre 88 a 90 °Brix (Mosquera et al., 2007) y se verifica el punto de panela, colocando una pequeña muestra en agua logrando su solidificación y una textura adecuada (Santín Sanchez, 2018). En todo este proceso térmico se emplea un horno subterráneo cuya fuente de calor es la combustión de bagazo (Figura 1.2).

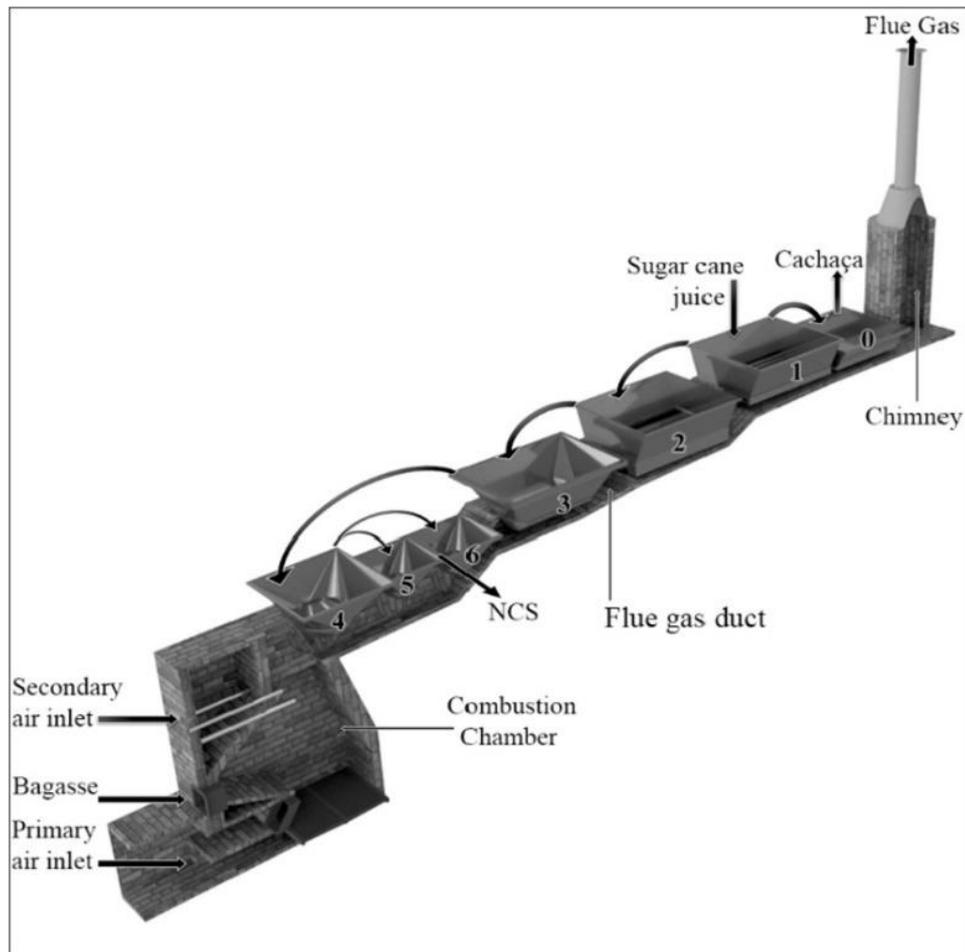


Figura 1.2. Esquema de Proceso Térmico

(Velásquez, Espitia, Mendieta, Escobar, & Rodríguez, 2019)

Finalmente, se traslada la miel formada a una paila, en cual se debe batir con paletas de aluminio logrando la granulación y cristalización de la sacarosa; también puede añadirse aire forzado para enfriar la panela (Jaffé, 2015). El producto obtenido se tamiza, se envasa y se almacena. El diagrama de todo el proceso se muestra en la Figura 1.3.

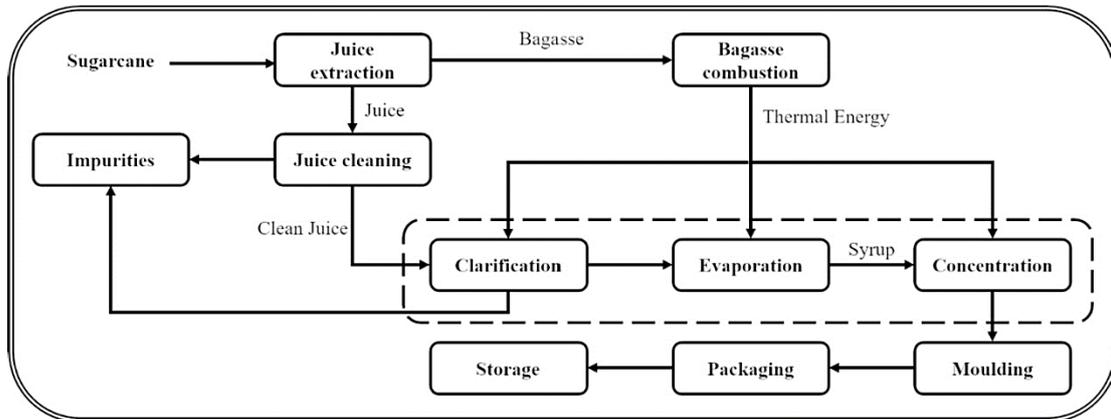


Figura 1.3. Diagrama de proceso de producción de panela (Velásquez et al., 2019)

1.4.4 La acrilamida en los alimentos

La acrilamida (2-propenamida) es una molécula orgánica soluble en agua que contiene en su estructura un grupo amida y un doble enlace electrófilo (Lasso, J. V. et al., 2014); tiene bajo peso molecular (71.08 kDa) y alto punto de ebullición (Keramat et al., 2011).

La acrilamida se origina naturalmente en el procesamiento térmico de los alimentos, con bajo contenido de agua, ricos en carbohidratos y a temperaturas usualmente superiores a 120°C (Reglamento (UE) 2017/2158, 2017; Rannou et al., 2016; Gökmen, 2015). Su mecanismo de producción acontece durante la etapa intermedia de la reacción de Maillard (Rannou et al., 2016; Schlumbach & Pautov, 2017), cuyos precursores son la asparagina y azúcares reductores (Mottram et al., 2002; Asikin et al., 2014) y donde el tiempo de cocción y pH del alimento también influyen en su formación (Keramat et al., 2011). En una matriz alimenticia con un rango ácido de pH se minimiza la formación de acrilamida por la protonación del grupo α -amino de la asparagina, en cambio, por tiempos prolongados de calentamiento los niveles de acrilamida aumentan por la expulsión del agua en la superficie del alimento y el posterior incremento de la temperatura (Fennema, 2017).

Según Zhang & Zhang (2007), la formación de este compuesto puede ocurrir mediante las siguientes rutas:

1. A partir del iluro de azometina I generada por la base de Schiff o por la oxazolidina-5-ona intermedia.
2. Descarboxilación del producto de Amadori

3. Pérdida de amoníaco de la 3-aminopropionamida derivada del ilometil de azometina II.

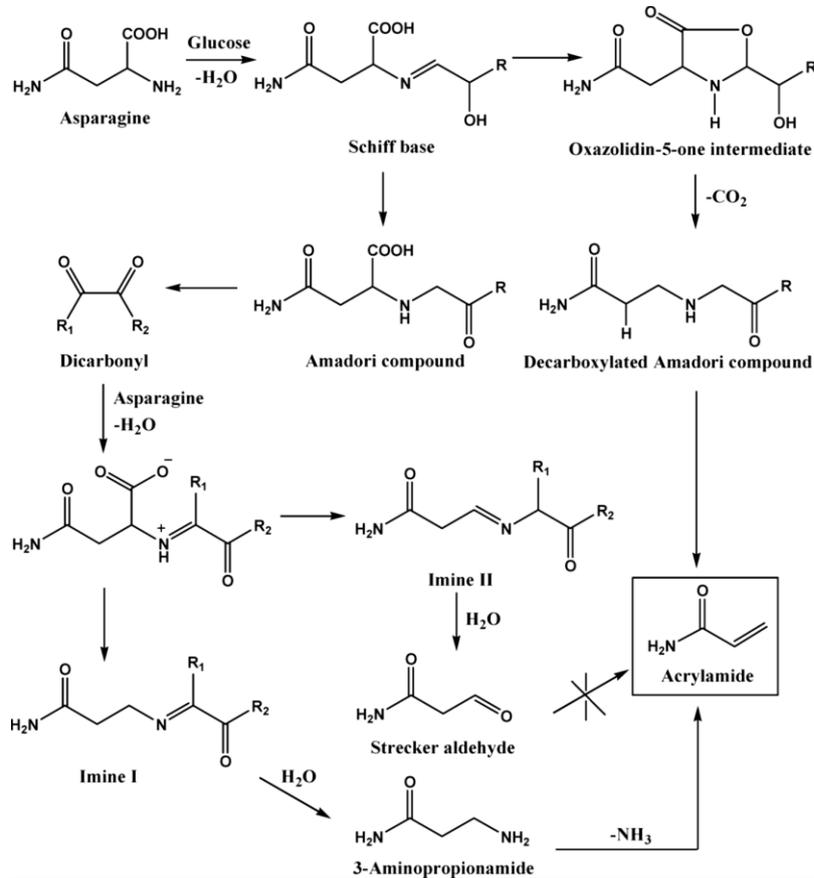


Figura 1.4. Mecanismo de formación de acrilamida
(Zhang & Zhang, 2007).

En el proceso de elaboración de panela, la formación de acrilamida ocurre debido a la disponibilidad de aminoácidos y presencia de azúcares reductores en el jugo de la caña de azúcar, además de que en las etapas de concentración, evaporación y punteo se emplea el calentamiento del jugo. En la concentración y evaporación se alcanzan temperaturas entre 100°C y 110°C, mientras que durante el punteo se emplean temperaturas hasta 120°C para concentrar el jugo; siendo la etapa con las condiciones ideales para la formación de acrilamida (Lasso, J. V. et al., 2014).

La acrilamida representa un riesgo para la salud de manera que fue catalogada como un posible carcinógeno por la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC, por sus siglas en inglés), y su exposición podría causar daños

severos al sistema nervioso (Gökmen, 2015). Asimismo, se considera una toxina reproductiva con propiedades mutagénicas y carcinogénicas debido a que en estudios *in vitro* e *in vivo* en mamíferos se observó que la acrilamida se convierte en glicidamida, causando daño al ADN (Velásquez et al., 2019; Zhang & Zhang, 2007).

En la actualidad no existe una concentración de acrilamida definida para panela; sin embargo, en la revista *Agro Food Industry*, se indica que la autoridad alemana de Protección del Consumidor y Seguridad Alimentaria (BVL, por sus siglas en alemán) expuso un valor de 1000 µg/kg para alimentos y bebidas, así mismo, también indica un valor de 800 µg/kg como referencia para panela.

El reglamento europeo 2017/2158 muestra que las buenas prácticas de higiene y procesos apoyados en un sistema HACCP podían reducir los niveles de acrilamida. Diversos autores han propuesto varias estrategias para mitigar la formación de este contaminante como el uso de sales (pirofosfato sódico) y ácidos orgánicos para reducir el pH, la adición de aminoácidos competitivos, o el uso de la enzima asparaginasa que hidroliza el grupo amida en la cadena lateral de la asparagina (Rannou et al., 2016).

Jung et al. demostraron un decrecimiento lineal en la formación de acrilamida al reducir el pH de 7.0 a 4.0 en el horneado de chips de maíz y papas fritas (Jung, Choi, & Ju, 2006); resultados similares fueron obtenidos al emplear ácido tartárico, cítrico láctico en galletas (Graf et al., 2006; Mosquera et al., 2007). Estas investigaciones indicaron que en valores reducidos de pH se disminuye la formación de acrilamida, además de una degradación del compuesto ya formado. Esto puede deberse a la hidrólisis del grupo carboxamida que forma ácido aspártico; igualmente la producción de acrilamida no se forma hasta que la actividad de agua de un alimento no esté al menos en 0.8 (Keramat et al., 2011). Asimismo, la FAO (2004) indicó una relación tiempo-temperatura en la formación de esta molécula: a temperaturas mayores a 120°C la velocidad de reacción aumenta considerablemente, pero a 170°C disminuye, probablemente por reacciones de degradación y eliminación a altas temperaturas (Fennema, 2017).

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

La metodología aplicada en el desarrollo de este trabajo de investigación partió de la revisión bibliográfica y, además, la visita in-situ a las unidades paneleras de la parroquia Palo Quemado de Cotopaxi, que ayudó a conocer el proceso de elaboración de panela granulada por ser el objeto de estudio. Luego de analizar las etapas del proceso de elaboración, se llevó a cabo un diseño experimental considerando el pH del jugo de caña y el método de clarificación como factores importantes para reducir la formación de acrilamida, que es producto de la reacción de Maillard. Las muestras de panela se elaboraron en el Laboratorio de Desarrollo y Procesamiento de Alimentos de la Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL) ubicado en Guayaquil, Guayas. Finalmente, las panelas obtenidas se caracterizaron mediante análisis fisicoquímicos considerando normas técnicas nacionales e internacionales.

2.1 Materiales

Para la elaboración de panela granulada, se utilizó caña *Saccharum Versícola* conocida como “caña morada”, cuyos tallos fueron cosechados en las zonas de cultivo de la parroquia Palo Quemado en la provincia de Cotopaxi y transportados a las instalaciones de la ESPOL, donde fueron almacenados en refrigeración hasta su molienda.

2.1.1 Preparación de soluciones

Preparación del mucílago de balsa (*Heliocarpus popayanensis*)

Se extrajo la parte interna de la corteza del árbol de balsa y se maceró en un mortero de porcelana. Se pesó 0.125 kg de corteza y se agregó en 1 litro de agua a 50°C, dejando en reposo hasta obtener una consistencia equivalente a la clara de huevo (Prada Forero, 2002).

Preparación de la sábila (*Aloe vera*)

Para su preparación se cortó una penca (hoja) de sábila y se extrajo con un cuchillo la parte interna (gel transparente). Se pesó 75 g de gel y se adicionó en 1

litro de jugo de caña, luego se homogenizó la solución para obtener una consistencia de gel.

2.2 Proceso de elaboración de panela granulada

2.2.1 Extracción y acondicionamiento del jugo de caña

La extracción de jugo de caña se realizó mediante la molienda de los tallos, utilizando un trapiche. Luego de su extracción, las propiedades fisicoquímicas del jugo (pH y °Brix) fueron analizadas. El jugo de caña fue acondicionado empleando un agente aglutinante (sábila o mucílago de balsa, según el diseño de experimentos) con el objetivo de facilitar la eliminación de sólidos no disueltos y sustancias coloidales en la siguiente etapa. Por último, se ajustó el pH inicial del jugo con una solución de carbonato de calcio según sea requerido.

2.2.2 Clarificación de jugo

Cinco litros del jugo de caña fueron utilizados para la elaboración de panela. El proceso se inició con la clarificación del jugo empleando una marmita con camisa de vapor a 10 psi de presión de trabajo durante 5 minutos. Cuando el jugo alcanzó 65°C, se retiró cuidadosamente la cachaza formada en la parte superior del líquido.

2.2.3 Evaporación del jugo

En esta fase se aumentó el contenido de azúcares del jugo de caña mediante la evaporación del agua en una marmita con camisa de vapor y agitación manual para homogenizar la exposición del jugo al calor. Adicionalmente, se controló el flujo de vapor de agua en la marmita a 20 psi de presión de trabajo durante 25 minutos y manteniendo la temperatura en 110°C. La etapa de evaporación del jugo finalizó al obtener un jarabe con una concentración de sólidos solubles de aproximadamente 70 °Brix y una viscosidad similar a la miel.

2.2.4 Concentración, punteo y batido

La concentración y punteo es el momento del proceso donde ocurre la cristalización de la sacarosa, para lo cual, se concentró el jarabe a 90 °Brix utilizando una marmita con flujo de vapor entre 40 a 50 psi por 10 minutos y manteniendo la temperatura a 115°C. Luego, se cerraron las entradas de vapor a la marmita y se empezó a batir el producto durante 5 a 10 minutos hasta formar

cristales de azúcares característicos de la panela granulada. El batido se realizó con una paleta de aluminio para facilitar el proceso y una mejor incorporación de aire, evitando así la aglomeración de los cristales.

2.2.5 Tamizado y empacado

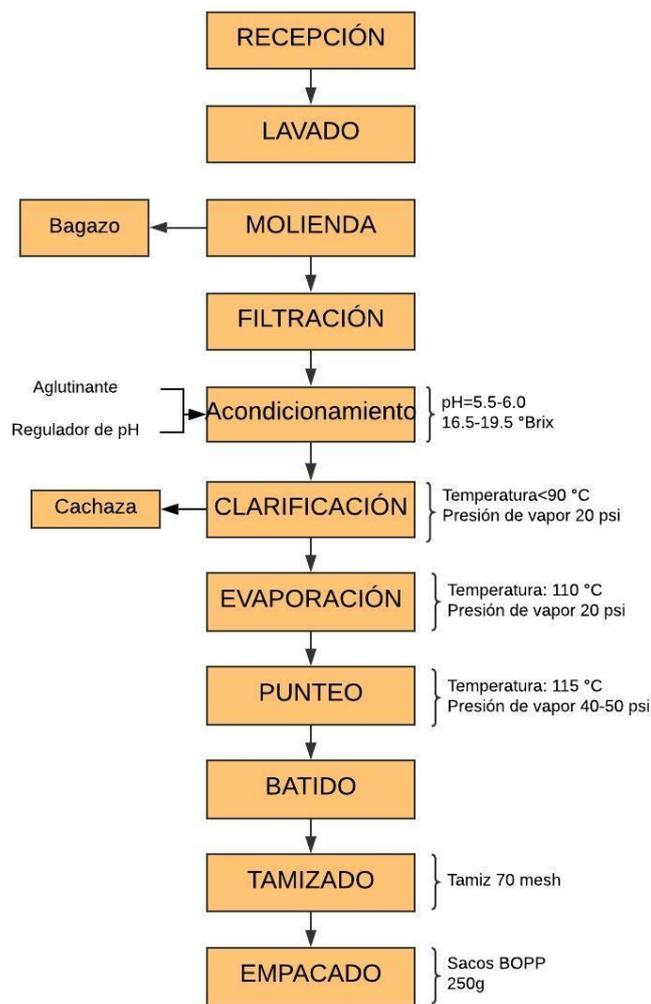


Figura 2.1. Diagrama del proceso de panela granulada en el laboratorio

Fuente: Elaboración propia.

En la figura 2.1 se resume el proceso de elaboración de panela y detalla las condiciones utilizadas en cada etapa del proceso, que finaliza con el tamizado de la panela obtenida usando una malla número 70 con el fin de homogenizar el tamaño del gránulo y se pesó 250 g de muestra cribada y luego se empacó en fundas de BOPP para almacenar el producto a una temperatura ambiente hasta realizar los respectivos análisis.

2.3 Diseño experimental

En el procedimiento experimental se planteó un diseño factorial completo, considerando como factores de estudio el pH del jugo de caña durante el acondicionamiento, así como también el empleo de agentes aglutinantes tales como balso (*Heliocarpus popayanensis*) y sábila (*Aloe vera*). La variable de respuesta fue la cuantificación del contenido de acrilamida en la panela granulada. Cada tratamiento se realizó por duplicado (Ver Tabla 2.1). Adicionalmente se elaboró un control, a cuya materia prima no se modificó el pH ni se agregó ningún tipo de aglutinante.

Tabla 2.1. Diseño factorial completo

Orden de Corrida	Bloques	pH	Aglutinante
1	1	5.5	Balso
2	1	6.0	Balso
3	1	5.5	Sábila
4	1	6.0	Sábila

Fuente: Elaboración propia.

2.4 Caracterización fisicoquímica del jugo de caña

2.4.1 Determinación del pH

Luego de calibrar el potenciómetro (Thermo Scientific Orion 5 Star) con soluciones buffer estandarizadas, se tomó alícuotas de 80 ml de jugo en vasos de precipitación para la correspondiente lectura. Entre cada lectura se lavó el electrodo usando agua destilada para no causar interferencias. Este análisis se realizó por duplicado (NTE INEN 0389:1985).

2.4.2 Determinación de sólidos solubles

Se utilizó un refractómetro para la concentración de azúcares disueltos en una solución, así mismo se colocaron gotas del jugo en el prisma del refractómetro para proceder la lectura a temperatura ambiente de 20°C (NTE INEN-ISO 2173:2013).

2.5 Propiedades y composición de panela granulada

2.5.1 Determinación del pH

Se prepararon las muestras disolviendo 6 g de panela en 6 ml de agua destilada (Norma Mexicana NMX-F-245-1983). Luego de calibrar el potenciómetro, se sumergió el electrodo en la solución de panela para la correspondiente lectura. Entre cada lectura se lavó el electrodo usando agua destilada y cada muestra se analizó por duplicado.

2.5.2 Determinación de sólidos solubles

Para la determinación de °Brix se utilizó un refractómetro digital (Sper Scientific 300053). Se prepararon las muestras disolviendo 6 g de panela en 6 ml de agua destilada (Hernández, 2014). Luego de la limpieza del prisma y calibración del equipo con agua destilada, se tomó pequeñas gotas de la dilución de panela y se procedió a la lectura. Cabe destacar que, los datos se ajustaron por el factor de dilución y cada muestra se analizó por duplicado.

2.5.3 Determinación del color

Colorimetría por coordenadas L^* , a^* y b^* .

Para la determinación del color se empleó el Sistema de Visión Computarizada (SVC) desarrollado por Chuchuca, Dick, & Peñafiel (2012). Se colocó aproximadamente 15 g de muestra en cajas Petri para cubrir su superficie, posteriormente las cajas fueron trasladadas a una cabina metálica con condiciones adecuadas de iluminación (interior blanco mate, y lámparas fluorescentes con temperatura de color de 6500 K). Se captó imágenes de las muestras en fondo blanco con una cámara digital Canon PowerShot SX530 HS, configurada en a) Modo manual, b) Flash desactivado, c) Modo de imagen 12M (4608x2592 pixeles), d) Compresión superfina, e) Medidor de luz ponderado central, f) Modo macro activado, g) Sensibilidad ISO 100 y h) Velocidad y apertura de enfoque 1/15 y f4.5 respectivamente.

Las imágenes obtenidas fueron procesadas con el software Adobe® Photoshop® CS5, la cámara digital capta las imágenes como valores en el espacio de color RGB que son transformados a coordenadas L^* , a^* y b^* mediante el software. Cada muestra se analizó por duplicado.

Colorimetría por ICUMSA

El color de la panela granulada también se determinó usando el protocolo estándar GS1/3-7 de ICUMSA. Se disolvió 3 g de muestra en 10 ml de solución y se ajustó el pH a 7.0 usando solución de hidróxido de sodio y ácido clorhídrico. Se filtró la solución modificada empleando un sistema de vacío con una membrana de nitrato de celulosa de 0.45 µm, posteriormente se midió por espectrofotometría con absorbancia a 420 nm (Synergy HTX). El color se calculó mediante la ecuación 2.1 (ICUMSA, 2003), expresándose en unidad de color ICUMSA o IU. Cada muestra se analizó por triplicado.

$$IU = \frac{Abs * 1000}{c} \quad (2.1)$$

c = concentración de sólidos totales (g/ml)

Para obtener el valor de la concentración de sólidos totales (c) se utilizó la ecuación 2.2, por lo que se midió °Brix de las soluciones.

$$Sólidos\ Totales = \frac{Brix * (a + b * Brix + c * Brix^2 + d * Brix^3 + e * Brix^4)}{100} \quad (2.2)$$

Donde:

$$a=0.9971843,$$

$$b=3.85738 \times 10^{-3},$$

$$c=1.254916 \times 10^{-5},$$

$$d=8.125659 \times 10^{-8},$$

$$e=5.611455 \times 10^{-10}$$

2.5.4 Determinación del contenido de humedad

Se determinó el contenido de humedad siguiendo el método estándar AOAC 930.15 (1996) y usando balanza termogravimétrica (Sartorius MA37-1). Se pesó aproximadamente 3 g de panela granulada en un platillo de aluminio y se colocó en la termobalanza para proceder a la lectura. Cada muestra se analizó por duplicado.

2.5.5 Determinación de cenizas totales

Se determinó el contenido de cenizas siguiendo el método estándar AOAC 923.03 (1990) y se pesó en un crisol seco 2.0 ± 0.5 g de panela granulada, que se colocó en la mufla a 550°C por 3.5 horas hasta obtener peso constante. La fracción porcentual se obtuvo con la relación entre el peso de las cenizas y el peso inicial de la muestra como indica la ecuación 2.3. Cada muestra se analizó por duplicado.

$$\%C = \frac{(m_2 - m)}{m_3 - m} \times 100 \quad (2.3)$$

Donde:

m = masa del crisol vacío en g

m_2 = masa del crisol con las cenizas insolubles

m_3 = masa del crisol con la muestra tomada para la determinación de cenizas totales.

2.5.6 Determinación de azúcares reductores

Para la determinación de azúcares reductores se empleó el método DNS (3,5-dinitrosalicílico), que se fundamenta en una reacción redox entre el DNS y los azúcares reductores que se encuentran en la muestra, produciendo una coloración con una intensidad proporcional al contenido de azúcares reductores (Hernández, 2014).

Se preparó una solución con 1 g de panela en 40 ml de agua destilada. Luego se mezcló en tubos eppendorf una alícuota de 500 μl de la muestra y 500 μl del reactivo DNS. Inmediatamente los tubos fueron calentados a 100°C en baño María por 10 minutos seguido de un enfriamiento en agua con hielo. Luego se colocó 200 μl de las muestras en una microplaca por triplicado para la correspondiente lectura utilizando espectrofotometría con absorbancia a 540nm (Synergy HTX). Finalmente, para la determinación de azúcares reductores se utilizó una curva de calibración de una solución de dextrosa anhidra. Cada muestra se analizó por duplicado.

2.5.7 Cuantificación del contenido de acrilamida

Las muestras resultantes de panela granulada de cada tratamiento fueron enviadas a un laboratorio externo (Analytica Alimentaria, Alemania) para la cuantificación del contenido de acrilamida. El método utilizado fue cromatografía líquida/ espectrofotometría de masa y el límite de cuantificación fue 50 µg/kg.

2.6 Análisis estadístico

Los resultados obtenidos se estudiaron mediante un ANOVA para evaluar diferencias significativas. Adicionalmente, se evaluó la correlación entre el contenido de acrilamida y color mediante el método de Pearson para establecer las relaciones entre variables. Todos los análisis estadísticos y gráficas se realizaron en el software Minitab 18.

2.7 Propuesta de solución en las unidades paneleras

Por medio del proceso de producción de panela descrito en el inciso 2.2, se planteó una propuesta de solución a corto plazo que ayuda a mejorarlo, desarrollado en las unidades paneleras y de esta forma obtener productos que cumpla con los requerimientos del cliente. La propuesta se basó en el empleo de equipos y materiales auxiliares que ayudan al productor a regular los parámetros de control. (Ver Figura 2.1)

2.7.1 Estimación de costos

Esta estimación se basó en los principales costos de producción de panela orgánica y la inversión que adquiere el productor por la compra de equipos y materiales auxiliares que necesitan ser empleados en cada unidad panelera para mejorar el proceso.

CAPÍTULO 3

3.RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Caracterización fisicoquímica del jugo de caña

El pH del jugo de caña usado para la elaboración de panela se encontró en un intervalo entre 5.40 y 5.48. Estos valores son inferiores a los sugeridos por otros estudios, quienes señalan que el pH óptimo del jugo debe estar entre 5.6 y 5.8 para evitar formación de azúcares reductores y facilitar el retiro de la cachaza (Cadavid, 2007; Mosquera et al., 2007).

Tabla 3.1. pH y °Brix del jugo de caña utilizado en los tratamientos

Tratamiento		pH	°Brix
pH	Aglutinante		
5.5	Balso	5.40	16.30
6.0	Balso	5.40	16.30
5.5	Sábila	5.53	17.90
6.0	Sábila	5.44	16.30
Control		5.48	19.50

Fuente: Elaboración propia

Los °Brix del jugo de caña se encontró en un intervalo de 16.30 a 19.50. Se sugiere que el jugo debe encontrarse entre 19 a 22 °Brix, debido a que se obtiene un mejor rendimiento del proceso al existir una mayor concentración de azúcares (Benítez & Guagalango, 2011; Ramírez et al., 2014). El tiempo de almacenamiento de la caña pudo haber ocasionado la disminución de los sólidos solubles, y aumentando el contenido de azúcares reductores por la inversión de la sacarosa (Cobeña & Loor, 2016; Granja & Granja, 2013).

3.2 Propiedades y composición de panela granulada

El análisis de acrilamida realizado a las muestras de los tratamientos indicó que el contenido de este compuesto era menor de 800 µg/kg, nivel solicitado por el cliente. Sin embargo, tal como lo reporta la literatura, otros factores como el tiempo y temperatura del tratamiento térmico podrían afectar a la producción de este compuesto (Keramat et al., 2011).

En la tabla 3.2 se presentan los valores de la caracterización fisicoquímica y composición de la panela granulada en cada uno de los tratamientos. El pH de las muestras elaboradas con jugos acondicionados a pH 5.5 reportaron valores menores en comparación al requisito estipulado por la Norma INEN 2 332:2002 (pH 5.9). En cuanto a las panelas de los demás tratamientos, el valor de pH es mayor al mínimo requerido. Según Clavijo & Lara (2008), la variación del pH puede ocurrir por el contenido de ácidos orgánicos, suceso que ocurre también en el azúcar refinada. El rango de pH se encontró cercano a los encontrados por Romo Pozos, Jiménez Guzmán, & García Bernal (2004), entre 5.7 a 6.0 en panela procesada entre diferentes regiones de Colombia, donde se subraya la tendencia de la panela hacia la neutralidad debido a que es un factor importante para la elaboración de bebidas.

Tabla 3.2. Caracterización de panela granulada.

Tratamiento		pH	°Brix	Azúcares reductores (%p/v)	Cenizas (%)	Humedad (%)
pH	Aglutinante					
5.5	Balso	5.81±0.05 ^{ab}	97.20±0.43 ^b	3.43±0.23 ^a	0.79±0.02 ^b	1.07±0.05 ^a
6.0	Balso	6.12±0.11 ^a	96.15±0.34 ^b	4.09±1.05 ^a	1.58±0.23 ^a	1.45±0.50 ^a
5.5	Sábila	5.65±0.07 ^b	97.85±0.82 ^a	2.89±0.68 ^a	0.85±0.27 ^b	0.82±0.02 ^a
6.0	Sábila	6.02±0.07 ^a	98.00±0.71 ^a	2.67±1.09 ^a	1.02±0.05 ^{ab}	1.05±0.16 ^a
Control		5.93	98.00	2.61	0.65	0.92

Cada media se expresa con desviación estándar (n=2)

Medias en la misma columna seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes (p<0.05)

Fuente: Elaboración propia.

Con respecto a los °Brix, las muestras de panela se hallaron en un intervalo entre 96.15 a 98.00 °Brix. Estos valores se encuentran cercanos a los reportados por Cadavid (2007), entre 90.0 a 98.9 °Brix. En el análisis ANOVA (Ver Apéndice A) se observó que el tipo de aglutinante afectaba significativamente los °Brix de la panela final (p<0.05).

En la figura 3.1 se observa que las muestras tratadas con sábila presentaron mayor °Brix que aquellas en las que se empleó balso en su composición. Este incremento en los °Brix pudo ser ocasionado por la composición química del *Aloe vera* debido a la presencia de mono- y polisacáridos como glucosa, manosa, galactosa, etc. (Morillo & Puma, 2009).

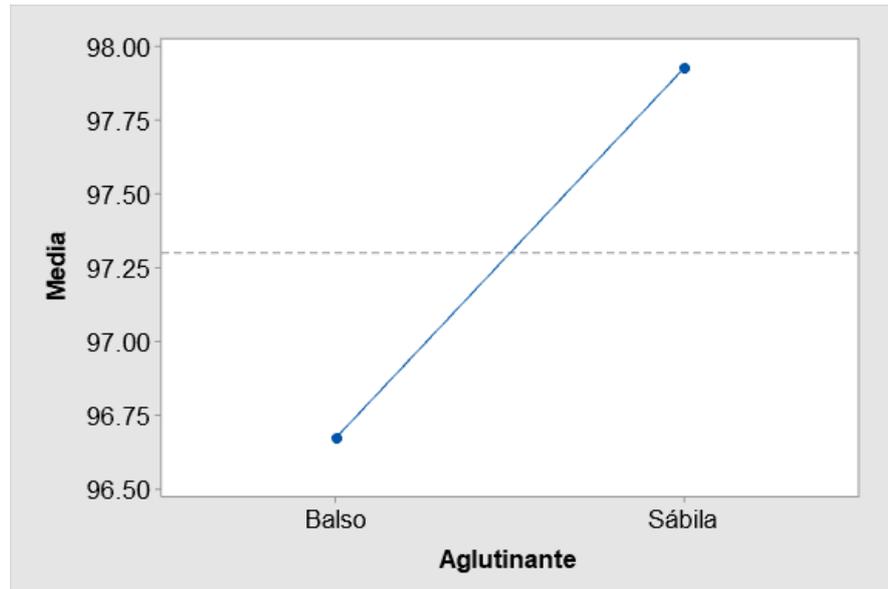


Figura 3.1. Gráfica de efectos principales de °Brix

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, los azúcares reductores encontrados en los tratamientos tuvieron valores entre 2.61 a 4.10%, los cuales son similares a los obtenidos por Rodríguez & Segura (2004), entre 3.60 a 4.04%. Así mismo, estos valores son menores al mínimo establecido por la Norma INEN 2 332:2002 (5.5%). En base al análisis de ANOVA, no se encontró que los factores del diseño experimental, tipo de aglutinante y pH, influyeran en el contenido de azúcares reductores.

En la tabla 3.2 se observa ligeras diferencias de contenido de azúcares reductores en muestras de panela tratadas con balso, esto podría explicarse por la composición química del aglutinante y por el tiempo de almacenamiento de la materia prima (Granja & Granja, 2013). El contenido de azúcares reductores no puede superar el 10 -12% según la normas NTE INEN 2 332: 2012 y NTC 1311: 2009, respectivamente, esto se debe a que aumenta la higroscopicidad y afectando la textura durante el almacenamiento (Guerra & Mujica, 2009).

El contenido cenizas (minerales) de los cuatro tratamientos presentó valores entre 0.81 y 1.45%. Estos resultados fueron superiores a los reportados en las tablas de composición de alimentos del Perú, 0.3% (Reyes, Gómes, Espinoza, Bravo, & Ganosa, 2009). No obstante, los valores se encuentran más cercanos a los reportados por otros estudios, entre 1.22 a 2.05% (Rodríguez & Segura, 2004; Romo Pozos, Jiménez Guzmán, & García Bernal, 2004). Estos indican que el contenido de minerales depende de la capacidad de absorción de la variedad de la

caña, la disponibilidad de minerales en el suelo y la cantidad de neutralizante agregado al proceso.

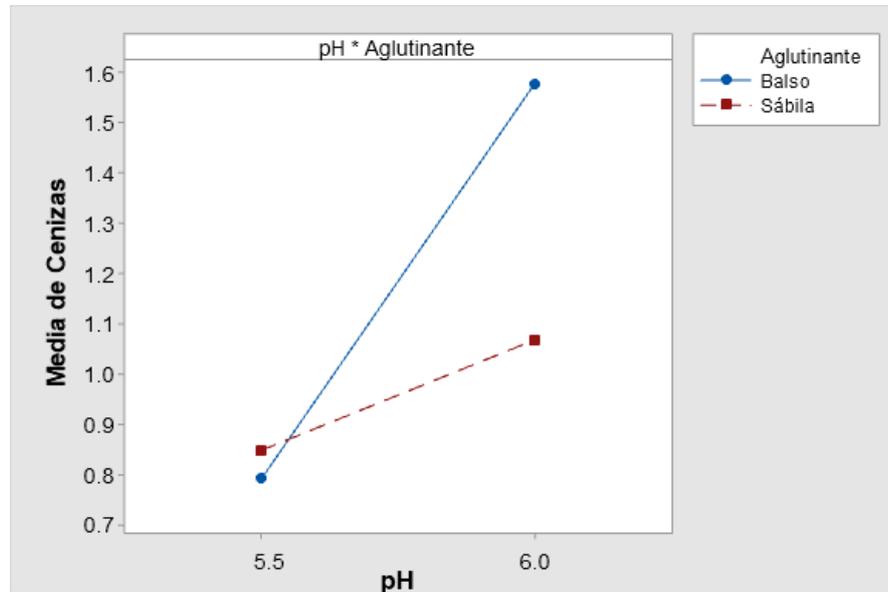


Figura 3.2. Gráfica de interacción de cenizas

Fuente: Elaboración propia.

La comparación del contenido de cenizas entre tratamientos mostró que el factor pH afectaba significativamente al porcentaje de cenizas ($p < 0.05$) (Ver Apéndice A). Como se observa en la figura 3.3, el contenido de ceniza aumentó a valores más altos de pH. Luego de comparar con el control, se sugiere que el aumento se debe a la adición de carbonato de calcio para regular el pH del jugo de caña o al uso de aglutinante debido a que también pudo haber aportado con minerales al producto. Con respecto al porcentaje de humedad en panela granulada, la norma NTE INEN 2 332:2002 recomienda un contenido máximo del 3%. Como se muestra en la tabla 3.2, las panelas obtenidas en todos los tratamientos no superaron este porcentaje, influido probablemente por las condiciones de tiempo y temperatura utilizadas durante el proceso, en lugar del pH o el tipo de aglutinante. Se observó también un ligero incremento no significativo del porcentaje de humedad en muestras de panela tratadas con balso.

Para concluir, la caracterización de la panela granulada en base al color, mediante el método $L^* a^* b^*$ y el método ICUMSA, se muestra en la tabla 3.3.

Tabla 3.3. Resultados de determinación de color por tratamiento

Tratamiento		L*	a*	b*	ICUMSA COLOR IU
pH	Aglutinante				
5.5	Balso	69.75±0.25 ^a	-3.5±1.0 ^b	39.25±1.25 ^a	5871.00±58.20 ^b
6.0	Balso	72.25±2.25 ^a	-0.5±0.5 ^b	42.75±3.75 ^a	6008.77±59.88 ^b
5.5	Sábila	74.50±2.00 ^a	-4.5±0.5 ^a	41.50±0.50 ^a	3563.30±378.86 ^a
6.0	Sábila	76.00±1.00 ^a	-2.5±0.5 ^a	45.75±0.25 ^a	4054.86±341.13 ^a
Control		78.5	-5	40.5	3825.75

Cada media se expresa con desviación estándar (n=2)

Medias en la misma columna seguidas de la misma letra no son significativamente diferentes (p<0.05)

Fuente: Elaboración propia.

Los colores de las panelas según método ICUMSA muestran diferencias significativas según el tipo de aglutinante usado en el proceso (Ver Apéndice A). Así mismo, la coordenada a* difiere entre las panelas según el tipo de aglutinante usado en el proceso. Los valores negativos en coordenada a* se debe a residuos de azufre que se pudo incorporar en la clarificación con el uso aglutinantes y clarificantes durante el procesamiento de panelas granuladas (Quezada et al. 2016).

Las panelas acondicionadas con balso poseen colores marrones, los cuales pueden ser el resultado de la falta de procesos de eliminación de melaza durante su producción, compuestos fenólicos y los pigmentos flavonoides que aún quedan en el cristal formado de sacarosa (Asikin et al., 2014). Por el contrario, el uso de sábila como agente aglutinante en el proceso de elaboración de panelas granuladas favorece la clarificación obteniendo colores y tonos más claros (Quiguiri, 2009).

Los colores oscuros y marrones también se encuentran relacionados con los productos de la reacción de Maillard que son favorecidos a pH básicos (Schlumbach & Pautov, 2017). Así mismo, los colorantes fenólicos presentes en el jugo de caña causan colores más altos en pH básicos y por lo tanto valores más altos de color ICUMSA (Schlumbach & Pautov, 2017). Sin embargo, los colores de las panelas tratadas a diferentes pH no mostraron diferencia significativa.

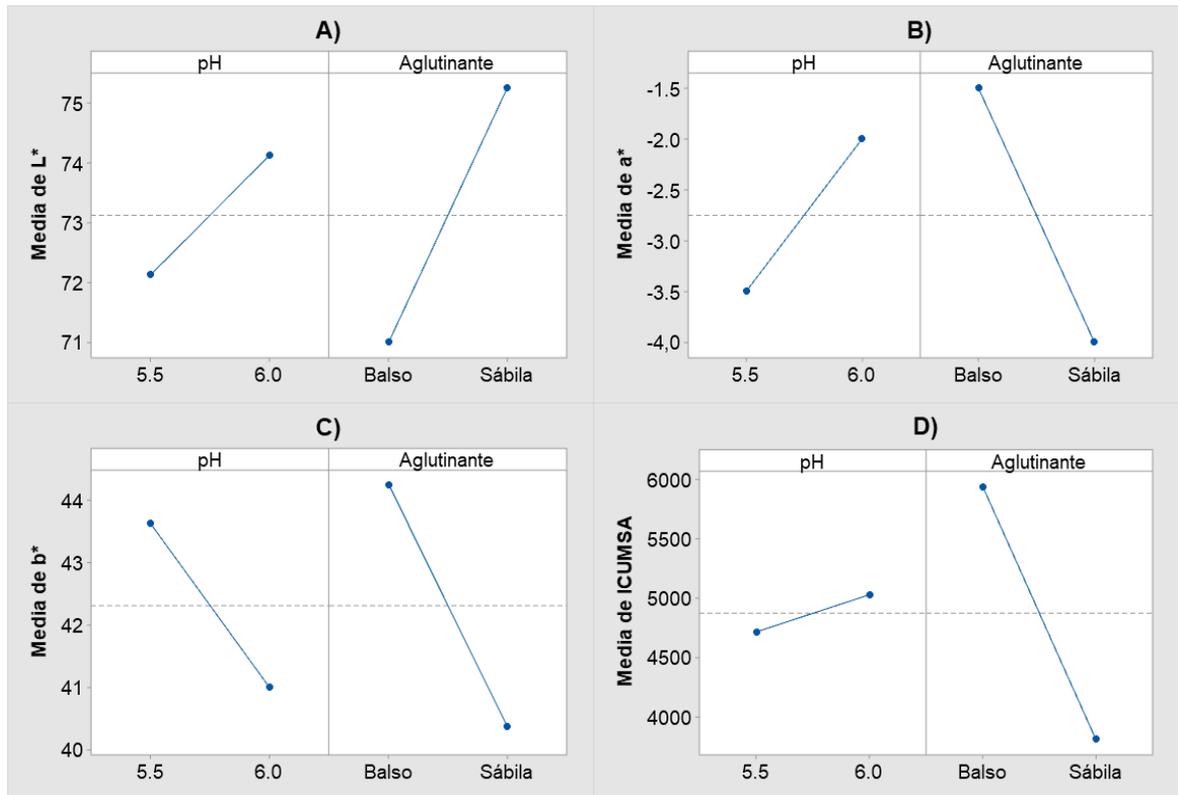


Figura 3.3. Efectos principales. A) Media de L*, B) Media de a*, C) Media de b*, D) Media de ICUMSA.

Fuente: Elaboración propia.

Adicionalmente, los valores positivos de la coordenada cromática b* indica que las panelas tienen tonos amarillos. Esta tonalidad no difiere significativamente ($p > 0.05$) entre los tratamientos. Así mismo, con respecto al nivel de luminosidad, descrito en la coordenada cromática L*, esta tampoco no difiere significativamente entre los tratamientos, aunque el valor más alto fue el obtenido en el tratamiento pH 6.0 y uso de sábila como aglutinante. La luminosidad de la panela parece estar influenciado por el grado de clarificación que se haya dado durante el procesamiento (Hernández, 2014).

El color ICUMSA y la coordenada cromática a* poseen correlación significativa 0.839 ($p < 0.05$); por lo tanto, se puede decir que son influenciadas por el tipo de aglutinante utilizado en el proceso. El valor más alto obtenido en la coordenada L* corresponde al tipo de aglutinante sábila con pH 6 (Figura 3.5A) y es inversamente proporcional al color ICUMSA con correlación de Pearson -0.718, $p < 0.05$ (Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Correlaciones en parejas de Pearson para variables de color

Variables		Correlación	IC de 95%	Valor p
a*	L*	-0.366	(-0.851; 0.456)	0.372
b*	L*	-0.901	(-0.982; -0.539)	0.002
ICUMSA	L*	-0.718	(-0.945; -0.026)	0.045
b*	a*	0.270	(-0.537; 0.819)	0.518
ICUMSA	a*	0.839	(0.328; 0.970)	0.009
ICUMSA	b*	0.533	(-0.274; 0.900)	0.173

Fuente: Elaboración propia.

3.3 Diagrama del proceso de elaboración de panela granulada

Posteriormente a la revisión bibliográfica y a la experimentación planteada en el proceso de elaboración de panela granulada a nivel de laboratorio, se propone varios cambios y controles que se deben realizar en cada unidad panelera en la parroquia Palo Quemado, Cotopaxi.

Se inicia con la cosecha de la caña de azúcar, cuyos índices de madurez deben encontrarse entre 0.9 y 1.0, evitando además que el tiempo entre la cosecha y la molienda sea extenso. Se recomienda entre 24 y 48 h, para disminuir las pérdidas de sacarosa en la caña y la disminución del rendimiento de proceso. Luego de obtener el jugo de caña se debe realizar un método de filtración mejorando su calidad y evitando el calentamiento constante en la clarificación por el tiempo que requiere el operario para retirar la cachaza.

En base a los análisis realizados a los diferentes tratamientos, el jugo de caña se debe acondicionar a pH 6.0 y emplear una solución de sábila al 1.5% p/v como método aglutinante, obteniendo así un producto con coloración más clara y cumpliendo, además, los requisitos establecidos en la normativa nacional INEN. Por el contrario, si se acondiciona el jugo de caña con pH 5.5 para la elaboración de panela no cumplen los requisitos de la normativa para el producto.

Durante la clarificación es importante además que las pailas se llenen con $\frac{3}{4}$ de su capacidad con jugo de caña facilitando el descachazado y evitando que durante la evaporación se derrame por la formación de burbujas. Así mismo, durante las etapas de clarificación, evaporación y punteo que comprenden el tratamiento térmico del proceso, se debe controlar temperatura y °Brix mediante el empleo de instrumentos de medición como termómetros y refractómetros de fácil manipulación

por el operario de cada unidad panelera. Las pailas con camisa de vapor son los equipos que se pueden utilizar durante este procesamiento térmico debido a que facilitan la manipulación y permiten una distribución homogénea del flujo de vapor a partir de bagazo como fuente de energía, manteniendo condiciones controladas en la producción de panela. Finalmente, en las etapas del batido y tamizado es necesario trasladar el producto a un área cerrada y protegida del ambiente de la zona de producción, evitando así la contaminación y humedad en la panela granulada.

La figura 3.6 resume el proceso descrito y presenta un diagrama de proceso utilizando sábila como aglutinante y ajustando el pH del jugo de caña a 6.0, con controles de temperatura y °Brix en cada etapa para minimizar la formación de los productos de la reacción de Maillard y acrilamida en la panela granulada.

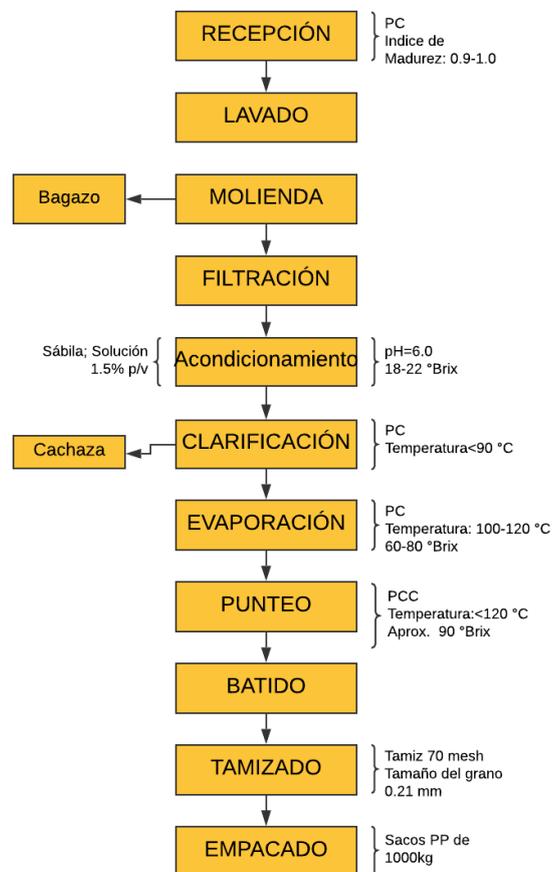


Figura 3.4. Diagrama del proceso de elaboración de panela granulada

Fuente: Elaboración propia.

3.4 Análisis de costos

En la tabla 3.5 se especifica cada etapa del proceso con una estimación de los porcentajes de merma; los cuales son necesarios para determinar la cantidad de materia prima a procesar en un batch de panela.

Tabla 3.5. Balance de materia prima

Proceso	Porcentaje de mermas	Peso final por etapa
Recepción	0.00%	1032.00 kg
Lavado	0.00%	1032.00 kg
Molienda	35.00%	670.80 kg
Clarificación	15.00%	570.18 kg
Evaporación	65.00%	199.56 kg
Punteo	15.00%	169.63 kg
Batido	5.00%	161.15 kg
Tamizado	5.00%	153.09 kg
Empacado	0.50%	152.32 kg
Total de merma	85.24%	
Rendimiento	14.76%	

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 3.6 se estima los costos de la materia prima considerando el rendimiento del proceso, así como la cantidad de aglutinante, regulador de pH y el valor del empaque.

Tabla 3.6 Costos de materia prima

Materia Prima Ingredientes	Costo MP (\$/Kg)	Costo por Día
Cañas	\$0.03	\$61.92
Aglutinante	\$0.10	\$0.20
Regulador de pH	\$1.16	\$1.20
Material Empaque		
Sacos PP	\$0.40	\$1.20
Total Materiales/MP	\$1.69	\$64.52

Fuente: Elaboración propia.

En el apéndice B se detalla el costo aproximado de la mano de obra, cuyos cálculos se realizaron en base a los días de producción (3 días) y número de batch diarios (2). Para el proceso trabajan 3 operarios con un sueldo básico de \$386.

En la tabla 3.8 se describe los equipos que se debe invertir en la unidad panelera para monitorear el proceso, controlando la madurez de la caña en la cosecha, el pH del jugo y la temperatura durante el tratamiento de térmico. También, en el apéndice B se describen la depreciación de los equipos tomando en cuenta 10 años de vida útil.

Tabla 3.8. Inversión de equipos

Maquinarias	Costo (Sin IVA)	Cantidad	Costo Total
Refractómetro	\$45.00	1	\$ 45.00
Potenciómetro	\$70.00	1	\$ 70.00
Termómetro	\$25.75	1	\$ 25.75
Balanza	\$105.00	1	\$ 105.00
Total	\$245.75	4	\$245.75

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente, se puntualiza los costos de producción de la panela granulada donde se toma en cuenta la mano de obra, materia prima, empaque, servicios de agua y energía. El precio de venta es \$40.93 por un saco de 100 kg panela granulada tomando en cuenta un margen de contribución de venta del 80%. Las unidades que se deben vender para recuperar la inversión de los equipos adquiridos en cada trapiche son 8 sacos de 100 kg de panela.

Tabla 3.7. Obtención de Punto de equilibrio

Costos fijos anual	\$136.02
Costos variables por saco	\$22.74
PVP	\$40.93
Punto de Equilibrio (und)	8

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- ✓ Durante el proceso de producción de panela orgánica granulada es posible minimizar la formación de acrilamida hasta valores menores a 800 µg/kg empleando temperaturas de proceso <120°C, pH del jugo de caña entre 5.5 y 6.0, sábila o balso como aglutinante, y usando equipos con alimentación de vapor entre 20 a 50 psi de presión de trabajo.

- ✓ Con base en los resultados de este trabajo, se plantea un diagrama de proceso para estandarizar la producción de panela granulada en la parroquia Palo Quemado, provincia de Cotopaxi. En este diagrama de proceso se consideran parámetros de recepción de materia prima como índice de madurez de la caña, °Brix y pH del jugo de caña y se establecen puntos de control de temperatura y °Brix en el tratamiento térmico, así como un punto crítico de control en la etapa de punteo procurando no pasar de 120°C en el jugo evaporado.

- ✓ El costo estimado de producción por 100kg de panela granulada, considerando el rendimiento del proceso a escala de laboratorio y la inversión en equipos de control es de \$40.93. Con un total de 8 sacos de 100 kg de panela se recupera la inversión asumida en la adquisición de los equipos necesarios para controlar el proceso de producción.

4.2 Recomendaciones

- ✓ Evaluar la variación de la temperatura empleadas en el proceso de producción de panela orgánica por efecto de la combustión directa del bagazo dado a cabo en las unidades panelera, y su posible efecto en la formación de acrilamida en el producto final.

- ✓ Validar los métodos de determinación de color de panela para monitorear la calidad del producto. En este proyecto se encontraron evidencias estadísticas que se encuentran relación entre el método ICUMSA y la coordenada cromática a^* del espacio $L^* a^* b^*$. El método CIE Lab puede ser más rápido y económico al momento de discriminar el producto final, en lugar de usar un método complejo.

- ✓ Investigar otros compuestos orgánicos como guásimo, cadillo y linaza que pueden ser utilizados como aglutinantes naturales durante el proceso de clarificación del jugo de caña para obtener panelas más oscuras y que pueden ser preferidas por un segmento del mercado. De este modo se puede evitar someter a altas temperaturas y reacciones de oscurecimiento. Por el contrario, se puede también evitar aglutinantes que puedan provocar colores no deseados por los consumidores.

BIBLIOGRAFÍA

- Asikin, Y., Hirose, N., Tamaki, H., Ito, S., Oku, H., & Wada, K. (2015). Effects of different drying–solidification processes on physical properties, volatile fraction, and antioxidant activity of non-centrifugal cane brown sugar. In *Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie* (Vol. 66). <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2015.10.039>
- Asikin, Y., Kamiya, A., Mizu, M., Takara, K., Tamaki, H., & Wada, K. (2014). Changes in the physicochemical characteristics , including flavour components and Maillard reaction products , of non-centrifugal cane brown sugar during storage. *Food Chemistry*, 149, 170–177. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.10.089>
- Benítez, J. P., & Guagalango, R. R. (2011). *Evaluación de dos biocidas e implicaciones económicas del procedimiento de sanitización de jugos de caña en el área de molinos del IANCEM*. Universidad Técnica del Norte.
- Cadavid, G. O. (2007). *Buenas prácticas agrícolas (BPA) y buenas prácticas de manufactura (BPM) en la producción de caña y panela*.
- Castillo, R. (2018). Retos para mejorar la producción de caña y azúcar bajo ambientes adversos en Ecuador. In *Seminario Internacional Producción y Optimización de la Sacarosa en el Proceso Agroindustrial de la Caña de Azúcar*. Punta Arena, Costa Rica.
- Chuchuca, G., Dick, A., & Peñafiel, J. (2012). *Implementación y Validación de una Metodología Económica para la Medición de Color Aplicada en Alimentos*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- Clavijo, Al., & Lara, N. (2008). Evaluación del descortezado en dos genotipos de caña de azúcar en la elaboración de panela granulada. *Memorias, II Congreso Ecuatoriano de Ingeniería En Alimentos y XI Jornadas de Ciencia y Tecnología En Alimentos*. Quito.
- Cobeña, J. J., & Loor, I. F. (2016). *Caracterización físico-química del jugo de cinco variedades de caña de azúcar (Saccharum officinarum) en la hacienda el jardín*. Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manabí.
- FAO. (2004). *Session of the Codex Committee on Food Additives and Contaminants (CCFAC)*. 15(April 2002).
- Fennema, O. (2017). *Food Chemistry* (Quinta Edi). Estados Unidos.

- Gökmen, V. (2015). *Acrylamide in Food: Analysis, Content and Potential Health Effects* (Primera Ed). Ankara: Academic Press.
- Graf, M., Amrein, T., Graf, S., Szalay, R., Escher, F., & Amadò, R. (2006). Reducing the acrylamide content of a semi-finished biscuit on industrial scale. *LWT - Food Science and Technology*, 39, 724–728. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2005.05.010>
- Granja, D., & Granja, J. (2013). *Producción de panela granulada*.
- Guerra, M. J., & Mujica, M. V. (2009). Physical and chemical properties of granulated cane sugar “panelas.” *Food Science and Technology*, 30, 250–257.
- Hernández, Y. (2014). *Elaboración de panela blanca a partir de jugo de caña purificado con carbón activado de bagazo y ultrafiltración*. Universidad Veracruzana.
- Ibarra González, C. V., Mancilla Villa, O. R., Guevara Gutiérrez, R. D., Hernández Vargas, O., Palomera García, C., Can Chulim, Á., ... & González, J. P. (2018). Rentabilidad de la caña de azúcar con manejo orgánico y convencional. *Idesia*, 36(3), 5–13.
- INEC. (2012). *Encuesta de Superficie y Producción Agropecuaria Continua ESPAC 2012*.
- Iqbal, M., Afzal Qamar, M., Bokhari, T. H., Abbas, M., Hussain, F., Masood, N., ... Nazir, A. (2017). Total phenolic, chromium contents and antioxidant activity of raw and processed sugars. *Information Processing in Agriculture*, 4(1), 83–89. <https://doi.org/10.1016/J.INPA.2016.11.002>
- Jaffé, W. (2015). Nutritional and functional components of non centrifugal cane sugar: A compilation of the data from the analytical literature. *Journal of Food Composition and Analysis*, 43, 194–202.
- Jung, M. Y., Choi, D. S., & Ju, J. W. (2006). A novel technique for limitation of Acrylamide formation in fried and baked corn chips and in french fries. *Journal of Food Science*, 68, 1287–1290. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2003.tb09641.x>
- Keramat, J., Lebail, A., & Prost, C. (2011). *Acrylamide in Baking Products : A Review Article*. 530–543. <https://doi.org/10.1007/s11947-010-0495-1>
- Lasso, J. V., Pérez, Y. T., Suárez, F. T., & Caballero, L. C. (2014). *Determinación de acrilamida en el procesamiento de la panela por cromatografía líquida*. 5(2), 99–106.
- Morillo, M. F., & Puma, M. E. (2009). *Determinación de parámetros óptimos para elaboración de gomas utilizando pulpa de sábila (Aloe vera)*. Universidad Técnica del Norte.
- Mosquera, S., Carrera, J., & Villada, H. (2007). Variables que afectan la calidad de la

- panela procesada en el Departamento del Cauca. *Facultad de Ciencias Agropecuarias*, 5(1), 17–26.
- Mottram, D., Wedzicha, B., & Dodson, A. (2002). *Acrylamide is formed in the Maillard reaction*. 419(October), 448–449.
- Prada Forero, L. E. (2002). *Mejoramiento en la calidad de miel y panela*.
- Prada, L., García, H., & Chaves, A. (2015). Efecto de las variables de evaporación: presión y flujo calórico en la calidad de la panela. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 16(1), 7–23.
- Quezada, W., Gallardo, I., & Torres, M. (2016). El color en la calidad de los edulcorantes de la agroindustria panelera. *Afinidad*, 573, 26–30.
- Quiguiri, M. M. (2009). *Estudio del proceso de clarificación del jugo de caña en la elaboración de panela*. Universidad Estatal Amazónica.
- Ramírez Durán, J., Burbano, O. I., & Viveros Valens, C. A. (2014). *Comportamiento agroindustrial de diez variedades de caña de azúcar para producción de panela en Santander*. 15, 183–195.
- Rannou, C., Laroque, D., Renault, E., Prost, C., & Sérot, T. (2016). Mitigation strategies of acrylamide, furans, heterocyclic amines and browning during the Maillard reaction in foods. *Food Research International*, 90, 154–176. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2016.10.037>
- Reglamento (UE) 2017/2158. *Reglamento (UE) 2017/2158*. , 2017 § (2017).
- Reyes, M., Gómez, I., Espinoza, C., Bravo, F., & Ganosa, L. (2009). *Tablas peruanas de composición de alimentos*.
- Rodríguez, A., & Segura, M. (2004). Panela granulada ecológica. *Revista Oficial de La Universidad Privada de Antenor Orrego*, 15(22), 47–55.
- Romo Pozos, A., Jiménez Guzmán, A., & García Bernal, H. (2004). *Caracterización nutricional de la panela granulada*.
- Santín Sanchez, M. (2018). *Evaluación del contenido de acrilamida durante el procesamiento de panela granulada y propuesta de reducción*. Universidad de Piura.
- Schlumbach, K., & Pautov, A. (2017). Crystallization and analysis of beet and cane sugar blends. *Journal of Food Engineering*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2016.10.026>
- Silva Cardoza, K. (2013). *Propuesta de Norma Técnica para panela granulada y proceso para su revisión y aprobación*. Universidad de Piura.
- Velásquez, F., Espitia, J., Mendieta, O., Escobar, S., & Rodríguez, J. (2019). Non-

centrifugal cane sugar processing: A review on recent advances and the influence of process variables on qualities attributes of final products. *Journal of Food Engineering*, 255, 32–40. <https://doi.org/10.1016/J.JFOODENG.2019.03.009>

Virginia Mujica, M., Guerra, M., & Soto, N. (2008). Efecto de la variedad, lavado de la caña y temperatura de punteo sobre la calidad de la panela granulada. *Interciencia*, 33(8), 598–603.

Zhang, Y., & Zhang, Y. (2007). Formation and reduction of acrylamide in Maillard reaction: a review based on the current state of knowledge. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 8398, 521–542. <https://doi.org/10.1080/10408390600920070>

APÉNDICES

APÉNDICE A

ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LAS PROPIEDADES Y COMPOSICIÓN DE LA PANELA

Modelo lineal general: ceniza vs. pH; Aglutinante
Información del factor

Factor	Tipo	Niveles	Valores
pH	Fijo	2	5,5; 6,0
Aglutinante	Fijo	2	Balso; Sábila

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
pH	1	0,5075	0,50747	15,93	0,016
Aglutinante	1	0,1024	0,10237	3,21	0,148
pH*Aglutinante	1	0,1610	0,16102	5,05	0,088
Error	4	0,1274	0,03186		
Total	7	0,8983			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,178487	85,81%	75,17%	43,26%

Ecuación de regresión

$$\begin{aligned}
 \text{ceniza} = & 1,0706 - 0,2519 \text{ pH}_{5,5} + 0,2519 \text{ pH}_{6,0} + 0,1131 \text{ Aglutinante}_{\text{Balso}} \\
 & - 0,1131 \text{ Aglutinante}_{\text{Sábila}} - 0,1419 \text{ pH} * \text{Aglutinante}_{5,5 \text{ Balso}} \\
 & + 0,1419 \text{ pH} * \text{Aglutinante}_{5,5 \text{ Sábila}} + 0,1419 \text{ pH} * \text{Aglutinante}_{6,0 \text{ Balso}} \\
 & - 0,1419 \text{ pH} * \text{Aglutinante}_{6,0 \text{ Sábila}}
 \end{aligned}$$

Modelo lineal general: grados brix vs. pH; Aglutinante
Información del factor

Factor	Tipo	Niveles	Valores
pH	Fijo	2	5,5; 6,0
Aglutinante	Fijo	2	Balso; Sábila

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
pH	1	0,4050	0,4050	1,03	0,367
Aglutinante	1	3,1250	3,1250	7,96	0,048
pH*Aglutinante	1	0,7200	0,7200	1,83	0,247
Error	4	1,5700	0,3925		
Total	7	5,8200			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
0,626498	73,02%	52,79%	0,00%

Ecuación de regresión

$$\text{brix} = 97,300 + 0,225 \text{ pH}_{5,5} - 0,225 \text{ pH}_{6,0} - 0,625 \text{ Aglutinante}_{\text{Balso}} + 0,625 \text{ Aglutinante}_{\text{Sábila}} + 0,300 \text{ pH}^* \text{Aglutinante}_{5,5} \text{ Balso} - 0,300 \text{ pH}^* \text{Aglutinante}_{5,5} \text{ Sábila} - 0,300 \text{ pH}^* \text{Aglutinante}_{6,0} \text{ Balso} + 0,300 \text{ pH}^* \text{Aglutinante}_{6,0} \text{ Sábila}$$

Modelo lineal general: a* vs. pH; Aglutinante

Información del factor

Factor	Tipo	Niveles	Valores
pH	Fijo	2	5.5; 6.0
Aglutinante	Fijo	2	Balso; Sábila

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
pH	1	4.5000	4.5000	3.60	0.131
Aglutinante	1	12.5000	12.5000	10.00	0.034
pH*Aglutinante	1	0.5000	0.5000	0.40	0.561
Error	4	5.0000	1.2500		
Total	7	22.5000			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
1,11803	77,78%	61,11%	11,11%

Ecuación de regresión

$$a^* = -2.750 - 0.750 \text{ pH}_{5.5} + 0.750 \text{ pH}_{6.0} + 1.250 \text{ Aglutinante}_{\text{Balso}} - 1.250 \text{ Aglutinante}_{\text{Sábila}} - 0.250 \text{ pH}^* \text{Aglutinante}_{5.5} \text{ Balso} + 0.250 \text{ pH}^* \text{Aglutinante}_{5.5} \text{ Sábila} + 0.250 \text{ pH}^* \text{Aglutinante}_{6.0} \text{ Balso} - 0.250 \text{ pH}^* \text{Aglutinante}_{6.0} \text{ Sábila}$$

Modelo lineal general: ICUMSA vs. pH; Aglutinante

Información del factor

Factor	Tipo	Niveles	Valores
pH	Fijo	2	5,5; 6,0
Aglutinante	Fijo	2	Balso; Sábila

Análisis de Varianza

Fuente	GL	SC Ajust.	MC Ajust.	Valor F	Valor p
pH	1	198027	198027	1,48	0,290
Aglutinante	1	9080636	9080636	68,05	0,001
pH*Aglutinante	1	62583	62583	0,47	0,531
Error	4	533754	133439		
Total	7	9874999			

Resumen del modelo

S	R-cuad.	R-cuad. (ajustado)	R-cuad. (pred)
365,292	94,59%	90,54%	78,38%

Ecuación de regresión

$$\begin{aligned} \text{ICUMSA} = & 4874 - 157 \text{ pH}_{5,5} + 157 \text{ pH}_{6,0} + 1065 \text{ Aglutinante}_{\text{Balso}} - 1065 \text{ Aglutinante}_{\text{Sábila}} \\ & + 88 \text{ pH} * \text{Aglutinante}_{5,5 \text{ Balso}} - 88 \text{ pH} * \text{Aglutinante}_{5,5 \text{ Sábila}} - 88 \text{ pH} * \text{Aglutinante}_{6,0 \text{ Balso}} \\ & + 88 \text{ pH} * \text{Aglutinante}_{6,0 \text{ Sábila}} \end{aligned}$$

APÉNDICE B

ANÁLISIS DE COSTOS DE LA PRODUCCIÓN DE PANELA ORGÁNICA

Costos de mano de obra directa

Mano de Obra	Total Obreros	Costo Mensual (\$)	Costo 13 ero (\$)	Costo 14to (\$)	Costo Aportaciones (\$)	Costo Anual (\$)
Recp-Lavado-Molienda	1	\$386.00	\$386.00	\$386.00	\$562.79	\$4632.00
Clarificación-Evaporación	1	\$386.00	\$386.00	\$386.00	\$562.79	\$4632.00
Punteo-Batido	1	\$386.00	\$386.00	\$386.00	\$562.79	\$4632.00
Totales	3	\$1158.00	\$1158.00	\$1158.00	\$1688.36	\$13896.00

Fuente: Elaboración propia

Inversión en equipos

Maquinarias	Costo (Sin IVA)	Cantidad	Costo Total	Tiempo vida útil	Depreciación Activos	Valor residual	Depreciación anual
Refractómetro	\$ 45.00	1	\$ 45.00	10	10%	\$ 4.50	\$ 4.05
Potenciómetro	\$ 70.00	1	\$ 70.00	10	10%	\$ 7.00	\$ 6.30
Termómetro	\$ 25.75	1	\$ 25.75	10	10%	\$ 2.58	\$ 2.32
Balanza	\$ 105.00	1	\$105.00	10	10%	\$ 10.50	\$ 9.45
Total	\$ 245.75	4	\$245.75	10	10%	\$ 24.58	\$ 22.12

Fuente: Elaboración propia

Estimación de costo de venta por saco de panela

Ingredientes		Cantidad	*UMB	Costo UMB	Costo Batch	Costo Mes	Costo Saco
Materia Prima	Caña de Azúcar	1032,00	Kg	\$0.03	\$30.96	\$743.04	\$20.64
	Aglutinante	1,00	Kg	\$0.10	\$0.10	\$2.40	\$0.07
	Regulador de pH	0,52	Kg	\$1.16	\$0.60	\$14.37	\$0.40
	Costo total	1033,52	Kg	\$1.29	\$31.66	\$759.81	\$21.11
Material Empaque	Sacos PP	3,00	und	\$0.40	\$1,20	\$28.80	\$0,40
Mano Obra	*MOD	3,00	Operarios	\$1491.70	\$18.65	\$447.51	\$0,18
Costo Indirecto	Agua	2,50	m3	\$0.50	\$1.25	\$30.00	\$0.83
	*EE	3,50	Kw/h	\$0.09	\$0.32	\$7.56	\$0.21
Total Costos directos					\$51.50	\$1236.11	\$21.69
Total Costos indirectos					\$1.57	\$37.56	\$1.04
Costo producción					\$53.07	\$1273.67	\$22.74
Costo x funda							\$22.74
Margen							\$18.19
*PVP							\$40.93

Fuente: Elaboración propia