

Estudio de factores que influyen en la producción de piloncillo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) empleando un diseño de Plackett Burman

Study of factors influencing the production of non-centrifugal sugar cane (*Saccharum officinarum* L.) using a Plackett Burman design

Eduardo Martínez-González¹, Diana B. Muñoz-Márquez¹, Martina de la Rosa-Hernández², Pedro Aguilar-Zárate¹, Carlos Reyes-Luna¹, Heriberto Ramírez-Cathí¹, Jorge E. Wong-Paz^{1*}

¹Departamento de Ingenierías, Campus Ciudad Valles, Tecnológico Nacional de México. Cd. Valles, S.L.P., C.P. 79010, México. Correo electrónico: jorge.wong@tecvalles.mx

²Laboratorio de Investigación en Alimentos, Unidad Académica Multidisciplinaria Zona Huasteca, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

*Autor de correspondencia

Resumen

La caña de azúcar en la Huasteca Potosina (México) es aprovechada para la obtención de azúcar de mesa (sacarosa) y piloncillo, este último se produce en menor medida de manera artesanal, teniendo gran demanda en el mercado regional y nacional desde su introducción como producto edulcorante alternativo a la sacarosa. En el presente estudio, se evaluaron los factores importantes en la producción artesanal de piloncillo usando el diseño exploratorio Plackett Burman. En los resultados, la temperatura, pH y concentración de azúcares tuvieron gran influencia sobre el color y la consistencia del producto final. Para elaborar piloncillo que cumpla con las características organolépticas para ser consumido, se recomiendan temperaturas > 100 °C, pH cercanos a 5.8 durante el encalado y periodos cortos de evaporación del jugo para evitar las altas concentraciones de azúcares reductores. El rendimiento máximo de producción obtenido por el método seleccionado fue de 160 g/L ± 10 g/L de jugo de caña utilizado.

Palabras clave: Piloncillo; sacarosa; azúcares.

Abstract

Sugar cane in the Huasteca Potosina (Mexico) is used to obtain table sugar (sucrose) and non-centrifugal sugar (NCS) (*piloncillo*) production, which is elaborated the traditional way; however, NCS has been in great demand in both regional and national markets since its introduction as an alternative to sucrose. In the present study, the main factors that influence the artisanal *piloncillo* production were evaluated by using the Plackett Burman experimental design. In the results, the temperature, pH and sugars concentration parameters had a major influence on the color and consistency of the final product. To obtain *piloncillo* that meets the organoleptic characteristics for it to be consumed, temperatures >100 °C, pH close to 5.8 during the whitewashing process and short evaporation times of juices are recommended to avoid high concentrations of reducing sugars. Finally, the maximum production yield obtained through the selected method was 160 g/l ± 10 g/l of used cane juice.

Keywords: *Piloncillo*; sucrose; sugars.

Recibido: 10 de enero de 2018

Aceptado: 21 de septiembre de 2018

Publicado: 16 de octubre de 2019

Como citar: Martínez-González, E., Muñoz-Márquez, D. B., de la Rosa-Hernández, M., P., Aguilar-Zárate, P., Reyes-Luna, C., Ramírez-Cathí, H., & Wong-Paz, J. E. (2019). Estudio de factores que influyen en la producción de piloncillo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) empleando un diseño de Plackett Burman. *Acta Universitaria* 29, e2188. doi: <http://doi.org/10.15174/au.2019.2188>

Introducción

En México, la caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) es considerada por la industria azucarera como el principal cultivo económico para la producción de diversos azúcares (Feng, Luo, Tao & Chen, 2015); en este caso, la sacarosa (azúcar de mesa) es el más abundante e importante dentro de la caña (Larrahondo, 1995). En la Huasteca Potosina, el tallo de esta planta es aprovechado como materia prima para la obtención de dos subproductos principales: el azúcar crudo o blanco y el piloncillo. Este último es producido en menor medida de manera artesanal; sin embargo, actualmente presenta una gran demanda en el mercado regional y nacional desde su introducción como producto edulcorante alternativo a la sacarosa (Aguilar, 2010). El piloncillo es un producto alimentario con alto contenido de carbohidratos, el cual se obtiene mediante la evaporación del jugo de caña de azúcar por ebullición (García, Narváez, Heredia, Orjuela & Osorio, 2017) y es también conocido como azúcar morena en el Sur de Asia, panela en América Latina, mascabado en Filipinas, azúcar mascabado en Brasil y Ryukyu Kokuto en Japón (Jaffé, 2012), por lo que es un producto considerado como internacional.

En San Luis Potosí, la elaboración de piloncillo representa la principal fuente de ingreso de pequeños productores en la región, aunado a que es un producto arraigado en la cultura, convirtiéndose en una forma de vida y único aporte económico familiar de estos. Dentro de los municipios productores en el estado se encuentran Tanchuítz, Aquismón, Tanlajás, Coxcatlán, Tampamolón, San Antonio y Huehuetlán; en conjunto, estos han formado la región piloncillera en la Huasteca Potosina (figura 1) (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [Sagarpa], 2007).



Figura 1. Zona piloncillera en la Huasteca Potosina.
Fuente: Elaboración propia

Actualmente, la introducción de otros subproductos derivados de la industria azucarera y extractos edulcorantes como el jarabe de maíz de alta fructosa (JMAF) han hecho que el mercado sea más competitivo (Baca-del Moral, Pacheco-Aparicio, Quintero-Peralta, Piza-Pano & Fabien, 2011). Sin embargo,

hoy en día, el piloncillo comienza a ser observado como un producto sustituto del azúcar común, bajo la visión de que pueda ser empleado a nivel industrial en la formulación de alimentos y bebidas funcionales.

Así mismo, al piloncillo se le ha relacionado con múltiples beneficios sobre la salud, en comparación al consumo del azúcar común, debido a una menor cantidad de efectos secundarios ligados en el desarrollo de enfermedades como la obesidad y la diabetes mellitus (Jaffé, 2012).

Entre las funciones benéficas ya reportadas sobre el uso y consumo de piloncillo están la función antiaterosclerótica por barrido de radicales séricos (Okabe *et al.*, 2008), función antidiabética (Gálvez, Kwon, Genovese, Lajolo & Shetty, 2008), anticancerígena, inmunológica y hasta antioxidantes (Asikin *et al.*, 2016; Jaffé, 2012). Estas ventajas, aunado al desarrollo de productos de bajo costo, así como altamente nutritivos en comparación con el azúcar de mesa tradicional, despierta el interés hacia una producción industrial a mayor escala. Desafortunadamente, durante la elaboración artesanal de piloncillo resulta necesario el estudio de diversos factores involucrados directamente en el proceso de producción, siendo necesario la estandarización del método para reducir las grandes variaciones en el producto final por lote. Por lo anterior, el objetivo de la presente investigación es la estandarización del proceso de producción de piloncillo de caña de azúcar cultivada en la Huasteca Potosina, estudiando las variables que influyen directamente durante su elaboración para la obtención de un producto de buena calidad con respecto al color, contenido en azúcares, humedad y pH.

Materiales y Métodos

Obtención de la materia prima

Se realizó el corte de un lote de caña de azúcar variedad Mex 69-290 (288 kg) cultivada en el Instituto Tecnológico de Ciudad Valles, San Luis Potosí (21° O 58' 55" de latitud Norte y los 99° O 00' 35" de longitud Oeste). Posteriormente, 60 L de jugo de caña fueron extraídos a partir de la molienda de los tallos utilizando un trapiche con motor eléctrico (3 hp). El jugo obtenido fue vertido directamente a las punteras de calentamiento a través de una canaleta de acero inoxidable.

Materiales

Los reactivos químicos utilizados en el presente estudio fueron grado analítico. El reactivo de Antrona (Sigma-Aldrich), el reactivo DNS (Sigma-Aldrich), la glucosa (dextrosa) (C₆H₁₂O₆) y el ácido sulfúrico (H₂SO₄) concentrado fueron proporcionados por el DIA-UADEC, México. Para la determinación de azúcares totales y reductores de las muestras de piloncillo se utilizó un espectrofotómetro *Spectronic Genesys 10 UV-Vis*.

Diseño experimental y análisis estadístico

Se aplicó un diseño experimental de Plackett Burman para establecer las condiciones adecuadas del proceso (Plackett & Burman, 1946). El nivel y el código de variables que intervienen (temperatura, cantidad de cal y manteca vegetal), de acuerdo con estudios previos (Martínez-González, Wong-Paz, Muñiz-Márquez & Reyes-Luna, 2016a; Martínez-González, E., Muñiz-Márquez, D., Reyes-Luna, C., Morales-Vázquez, I., & Wong-Paz, 2016b), se muestran en la tabla 1.

A partir de 27 condiciones experimentales establecidas, se seleccionaron al azar nueve tratamientos, de acuerdo con un análisis estadístico, utilizando el programa STATISTICA 7.0 y el arreglo Plackett-Burman. Los diseños experimentales se presentan en la tabla 2.

Tabla 1. Códigos y valores de las variables estudiadas en tres niveles diferentes

Símbolo	Factor	Nivel de los factores		
		-1	0	+1
A	Cal (g/L)	0.5	1	1.5
B	Temperatura (°C)	80	90	100
C	Manteca (g/L)	0	1	1.5

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 2. Matriz de diseño experimental Plackett-Burman de tres variables evaluadas

Tratamiento	A	B	C
1	0.5	80	0.5
2	0.5	90	1.5
3	0.5	100	1
4	1	80	1.5
5	1	90	1
6	1	100	0.5
7	1.5	80	1
8	1.5	90	0.5
9	1.5	100	1.5

Fuente: Elaboración propia.

Validación de las condiciones óptimas

Para la producción de piloncillo se usaron 5 L de jugo de caña de azúcar por duplicado para cada tratamiento; la metodología se describe en la figura 2. Desde el inicio, durante cada proceso, se realizó una cinética de medición de la temperatura, pH y concentración de °Brix de la materia prima. Posterior a la etapa de calentamiento, se adicionaron 2 g de cal para la modificación del pH y 2 g de manteca vegetal como agente antiespumante. Los rendimientos de piloncillo obtenido se expresaron en g/L de jugo de caña utilizado en base al peso de la muestra medida. Finalmente, se realizó un análisis de varianza en el programa STATISTICA 7.0 para conocer el efecto de cada una de las variables estudiadas.

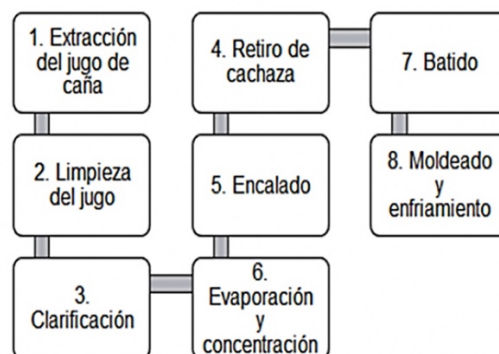


Figura 2. Principales etapas del proceso de elaboración del piloncillo.
Fuente: Elaboración propia.

Determinación de azúcares totales (AT) por el método de Antrona

La determinación de los AT se realizó de acuerdo con la metodología descrita por Alia-Tejagal, Colinas-León, Martínez-Damián & Soto-Hernández (2002), utilizando una curva estándar con glucosa a 25 mg/L, 50 mg/L, 75 mg/L, 100 mg/L, 125 mg/L, 150 mg/L, 175 mg/L y 200 mg/L bajo la reacción del reactivo de Antrona con un blanco de agua destilada. Para ello, se prepararon soluciones de piloncillo y jugo de caña disueltas en agua destilada. El reactivo de Antrona se preparó disolviendo 100 mg en 50 ml de H₂SO₄ concentrado y se guardó en un frasco ámbar. Por triplicado, 0.5 ml de muestra (dilución 1:10 000) fueron colocados en tubos de ensaye y se mantuvieron en un baño de hielo durante 5 min. Posteriormente, se adicionó 1 ml de reactivo de Antrona por tubo y se mezclaron en un Vortex. La reacción se llevó a cabo a 80 °C en un baño de agua por 15 min; una vez atemperadas, las muestras se leyeron en un espectrofotómetro a 530 nm.

Determinación de azúcares reductores (AR)

De acuerdo con la metodología descrita por Bello, Carrera & Díaz (2006), se preparó una curva estándar con glucosa y agua destilada a concentraciones conocidas bajo la reacción del reactivo DNS usando un blanco de agua destilada. Por triplicado, se colocaron en tubos de ensaye 10 µl de muestra diluida (dilución 1:10 000) de piloncillo y jugo de caña; enseguida, se agregaron 10 µl de reactivo DNS, se mezclaron las muestras y se llevaron a ebullición en un baño de agua por 5 min para realizar la reacción. Las muestras se diluyeron con 2 ml de agua destilada y se leyeron en un espectrofotómetro a 540 nm.

Resultados y Discusión

Análisis estadístico de los resultados

El código y los valores de las variables evaluadas durante el diseño experimental en tres niveles se presentan en la tabla 1; la matriz experimental Plackett-Burman, decodificada para nueve condiciones experimentales, se muestra en la tabla 2. De acuerdo con Mosquera, Carrera & Villada (2007) y Martínez-González *et al.* (2016a), factores como la temperatura de evaporación, la adición de cal durante el encalado y la manteca son considerados puntos críticos de control (PCC) durante el proceso de elaboración del piloncillo. Esto debido a que dichas variables actúan como modificadores de pH y antiespumantes respectivos que afectan directamente la calidad del producto final que se desea.

Los resultados en rendimiento de piloncillo obtenido (g/L), de los nueve tratamientos corridos en el presente estudio, se muestran en la figura 3. Estadísticamente, los tratamientos T1, T2 y T3 fueron iguales, reportando máximo rendimiento; el resto (T4, T5, T6, T7, T8 y T9) presentaron valores de producción muy bajos. Por otra parte, el diagrama de Pareto (figura 4) obtenido durante el análisis de datos permite distinguir cuál de las variables estudiadas tuvo mayor influencia significativa en la eficacia del proceso de producción de piloncillo en función del rendimiento. Por lo tanto, la cantidad de cal usada (var 1) fue la variable con mayor impacto sobre el rendimiento de producción de piloncillo, de manera lineal y cuadrática, seguido de la cantidad de manteca vegetal y temperatura, ambos solo de manera lineal.

De acuerdo con la literatura consultada, la cal es reportada como un coadyuvante en la floculación de las impurezas durante la producción de piloncillo (Prada, García & Chaves-Guerrero, 2014). Con base en esto, se puede mencionar que la adición de cal permite mejorar la calidad y rendimiento de piloncillo durante su elaboración, puesto que facilita la eliminación de impurezas (cachaza) y compuestos con color no deseado en el producto final. Sin embargo, como se observa en la figura 3, los mejores rendimientos de piloncillo fueron obtenidos con aquellos tratamientos que emplearon menor cantidad de cal en su formulación (tabla 2). Además, de manera contraproducente, el incremento de las cantidades de cal usada

en cada tratamiento resultó en una disminución del rendimiento de piloncillo producido, probablemente debido a algún posible acomplejamiento y consecuente precipitación del producto.

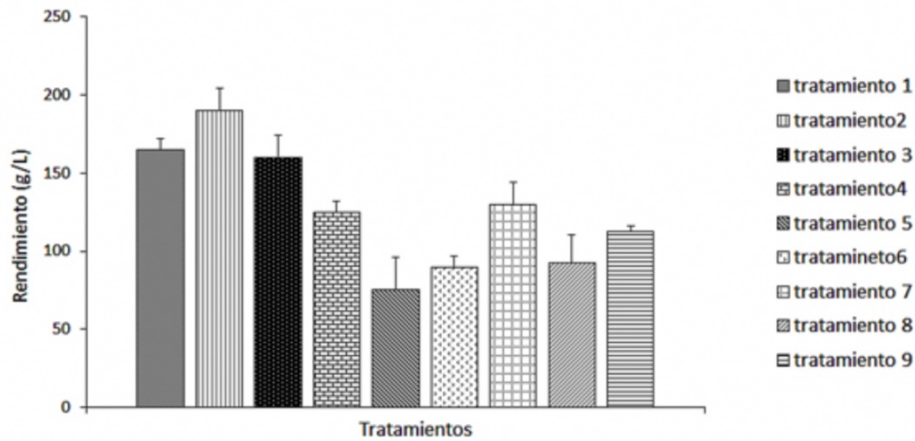


Figura 3. Rendimientos de piloncillo obtenidos a partir del diseño experimental Plackett Burman.
Fuente: Elaboración propia.

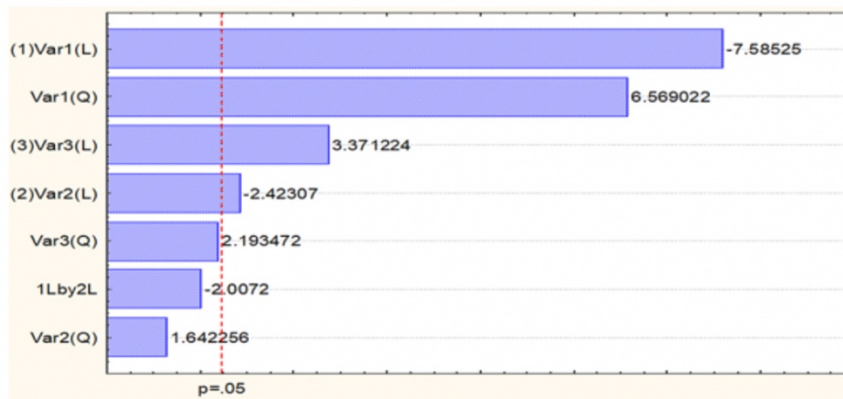


Figura 4. Diagrama de Pareto estandarizado de efectos principales sobre el diseño factorial durante la producción de piloncillo. La línea vertical indica el límite de significación estadística para los efectos A (Cal), B (Temperatura) y C (Manteca).
Fuente: Elaboración propia.

Después del análisis estadístico realizado, la selección del mejor tratamiento se determinó con base en una menor variación entre duplicados respecto al rendimiento obtenido y propiedades físicas como el color y textura, por considerarse atributos de calidad del producto final. Por lo tanto, el tratamiento seleccionado dentro de los nueve tratamientos evaluados fue el T3, ya que las condiciones de temperatura e ingredientes añadidos (cal y manteca) no solo permitieron buenos rendimientos y mejor control del proceso sino aspectos físicos deseables (datos no mostrados) en el producto final (figura 5). El resto de los tratamientos fueron descartados, pese a que T1 y T2 también dieron valores altos de producción sobre los nueve experimentos realizados. Sin embargo, los tiempos de proceso fueron largos, probablemente por efecto de la temperatura usada (80 °C y 90 °C, respectivamente) (Mosquera *et al.*, 2007); por lo tanto, se consideraron como inadecuados e ineficientes. Al final, el rendimiento total de piloncillo obtenido en el tratamiento seleccionado (T3) resultó de 160 g/L \pm 10 g/L de jugo de caña utilizado.



Figura 5. Aspecto físico de los piloncillos obtenidos para cada tratamiento del diseño experimental desarrollado.
Fuente: Elaboración propia

Evaluación de las variables fisicoquímicas

Debido a que T3 presentó mejores rendimientos, las evaluaciones posteriores fueron enfocadas hacia estas condiciones experimentales, aunado a que presentó mejor control durante el proceso de elaboración al obtenerse mayor calidad en el producto final.

En general, en el proceso se pudieron observar tres etapas de calentamiento de los jugos; la primera fue la rampa de calentamiento, la segunda el mantenimiento de la temperatura y la tercera fue un incremento de temperatura dada la concentración de azúcares en el jugo. Para el caso de T3, la temperatura se mantuvo a la marcada en el diseño experimental (figura 6). Dicha cinética de temperatura tuvo un comportamiento similar al reportado por Mujica, Guerra & Soto (2008), donde obtienen una fase inicial ascendente por aumento de la temperatura a una velocidad aproximadamente constante, para seguir la fase de ebullición con la temperatura casi constante (98.7 °C - 99.8 °C) y, finalmente, aumentar a una velocidad considerable. Cabe mencionar que este tipo de cinéticas nos permite conocer la pureza de jugo de caña utilizado para el proceso de elaboración de piloncillo.

Por otro lado, el aumento de la concentración de azúcares (°Brix) por evaporación de agua contenida en el jugo de caña se muestra en la figura 6. Claramente se observa que, una vez alcanzados los 40 °Brix, el incremento de estos es de manera constante, lo que se consideró como un punto crítico durante la producción de piloncillo debido a que se alcanza "el punto de miel" por aumento de la viscosidad hasta provocar la caramelización (Martínez-González *et al.*, 2016b). Además, cuando los °Brix sobrepasan el valor ideal, no es posible ejercer un control estricto que evite el deterioro del producto final a consecuencia de la degradación de la sacarosa contenida en el jugo de la caña, afectando la calidad del producto final (Solís-Pacheco *et al.*, 2006).

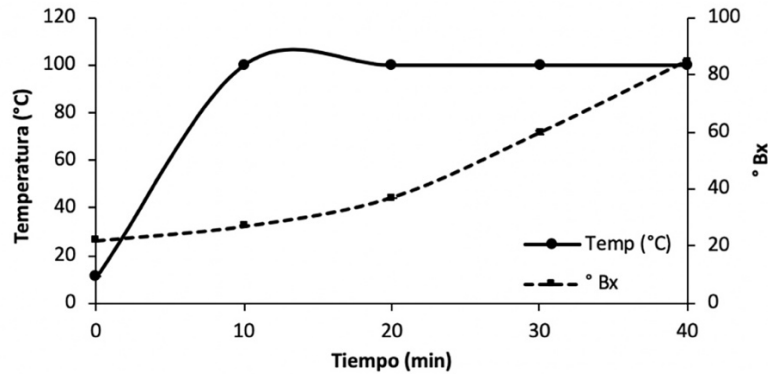


Figura 6. Cinética de temperatura y °Brix durante el proceso de producción de piloncillo con T3. La línea sólida representa la temperatura y la línea punteada los °Brix.
Fuente: Elaboración propia.

La adición de cal durante el precalentamiento del jugo (encalado) es considerado como uno de los principales PCC en la elaboración del piloncillo (Teves, 2016). En este caso, el pH inicial del jugo de caña fue de 5.3 y 6.2 al punto final para el T3, observándose un aumento moderado de pH 7.0 a los 60 min por la adición de cal (figura 7). Estas mediciones se consideran adecuadas, ya que se han reportado para el jugo de caña valores de pH iniciales de 5.6 a 5.8 en la producción de piloncillo de buena calidad (Mosquera *et al.*, 2007).

La reducción de la acidez natural del jugo de caña, por efecto de la cal, limita la formación de azúcares invertidos durante la clarificación (Teves, 2016). Condiciones óptimas de clarificado se ha logrado entre valores de pH de 8 y 9.5 (Hamerski, Da-Silva, Corazza, Ndiaye & De-Aquino, 2011); sin embargo, aumentos superiores de pH a 5.7 (como el registrado durante la cinética) provocan coloraciones oscuras de baja aceptación para el producto deseado (Prada, García & Chaves-Guerrero, 2015).

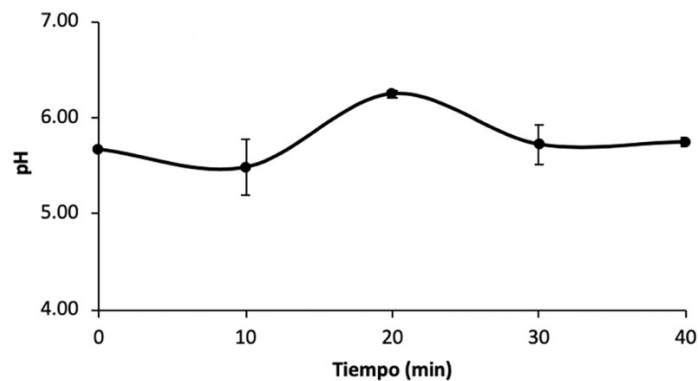


Figura 7. Cambios de pH por adición de la cal durante el proceso de producción de piloncillo bajo T3.
Fuente: Elaboración propia.

Azúcares totales y azúcares reductores

La determinación cuantitativa de la concentración de azúcares totales en la elaboración de piloncillo permitió conocer el efecto de las variables estudiadas sobre la calidad del producto final obtenido durante la estandarización. Las concentraciones totales obtenidas para el jugo de caña inicial, y como subproducto contenido en el piloncillo obtenido con T3, se presentan en la tabla 3.

En el jugo de caña, los azúcares reductores representan el 10% de los azúcares totales y los no reductores el 90% (siendo mayoritaria la sacarosa); mientras que, en el piloncillo, el 3% es representado por azúcares reductores y el 97% por no reductores. Respecto a lo anterior, se puede mencionar que las condiciones experimentales de T3, temperatura a 100 °C y pH entre 5.3 - 5.8 ocasionaron una disminución en la concentración de azúcares reductores con respecto a los azúcares totales y lo contrario ocurrió para los azúcares no reductores, los cuales se incrementaron en el piloncillo. Este es un punto crucial, ya que las altas concentraciones de azúcares reductores afectan considerablemente la consistencia final del producto, llegando incluso a impedir la cristalización de la sacarosa, obteniéndose a un producto de mala calidad (Mujica *et al.*, 2008). Así mismo, el tiempo de cocción también fue un parámetro clave para la obtención de piloncillo con el tratamiento seleccionado, ya que se sabe que la inversión química de la sacarosa es favorecida con la disminución del pH por efecto de la cal y el aumento de la temperatura en la evaporación (Mujica *et al.*, 2008). Aunado a esto, Ruge & Pérez (2017) recomiendan reducir el tiempo de cocción y usar un pH cercano a 5.8 para evitar el aumento de azúcares reductores por la aceleración de la inversión de sacarosa a partir de los 100 °C. Finalmente, las cantidades de manteca y cal incorporadas no solo tuvieron el objetivo de actuar como antiespumantes y reguladores de la acidez en los jugos bajo un pH óptimo, sino el de prevenir la formación de azúcares reductores, ayudar a la clarificación de los jugos y lograr la consistencia adecuada para piloncillo de buena calidad. Finalmente, aunque no se evaluó este aspecto, la variedad y origen geográfico de la caña utilizada debe considerarse debido a que no solo el calentamiento es crucial en el color resultante del piloncillo como producto final sino también depende del contenido en compuestos activos y otros componentes que reaccionan formando distintas propiedades organolépticas (García *et al.*, 2017; Asikin *et al.*, 2014).

Tabla 3. Concentración de azúcares reductores, no reductores y azúcares totales en jugo de caña inicial y piloncillo T3 seleccionado

Muestra	Azúcares	g/L
Jugo de caña	Totales	721±9
	Reductores	74±3
	No reductores	646±0
Piloncillo	Totales	523±0
	Reductores	15±0
	No reductores	508±0

Fuente: Elaboración propia de los autores.

Conclusiones

Se logró obtener piloncillo de buena calidad a partir del estudio del efecto de tres variables como son la temperatura, pH y concentración de cal durante la elaboración artesanal de piloncillo usando el diseño factorial Plackett Burman. El impacto de la adición de cal sobre la regulación de la acidez de los jugos de caña, así como temperaturas mayores a 100 °C y la concentración de °Brix durante la evaporación de los jugos, fueron puntos críticos que deben controlarse durante la elaboración del piloncillo. El aumento en las concentraciones de azúcares reductores y su efecto negativo sobre la consistencia y coloración del producto final puede evitarse si se logra controlar el tiempo de exposición de los jugos a altas temperaturas. Por último, los resultados de esta investigación contribuyen al conocimiento de la estandarización del proceso de elaboración del piloncillo en las que futuras investigaciones busquen establecer y controlar las condiciones óptimas para la obtención de un producto de calidad. Este grupo de investigación trabajará en el escalado a nivel piloto de las condiciones seleccionadas en esta investigación.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Instituto Tecnológico de Ciudad Valles, San Luis Potosí y al Departamento de Investigación en Alimentos (DIA) por el préstamo de materiales y equipo necesarios para llevar a cabo esta investigación. También agradecen al Dr. Cristóbal Noe Aguilar González y al C. Dr. Ramón Larios Cruz por la asesoría en las determinaciones analíticas. Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento del proyecto con clave 6061.17-P.

Referencias

- Aguilar Rivera, N. (2010). Diálogos, *Revista Electrónica de Historia*, 11(1), 81-110.
- Alia-Tejagal, I., Colinas-León, M. T., Martínez-Damián, M. T., & Soto-Hernández, M. (2002). Factores fisiológicos, bioquímicos y de calidad en frutos de zapote mamey (*Pouteria sapota* Jacq. H.E. Moore & Stearn) durante postcosecha. *Revista Chapingo Serie Horticultura*, 8(2), 263-271. doi: <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchsh.2001.11.083>
- Asikin, Y., Hirose, N., Tamaki, H., Ito, S., Oku, H., & Wada, K. (2016). Effects of different drying-solidification processes on physical properties, volatile fraction, and antioxidant activity of non-centrifugal cane brown sugar. *LWT, Food Science and Technology*, 66, 340-34. doi: <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. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.10.089>
- Baca del Moral, J., Pacheco Aparicio, A., Quintero Peralta, M. A., Piza Pano, J. L., & Fabien, C. (2011). El sistema agroindustrial localizado de piloncillo en la Huasteca Potosina. *Textual (análisis del medio rural latinoamericano)*, 56,137-156.
- Bello Gil, D., Carrera Bocourt, E., & Díaz Maqueira, Y. (2006). Determinación de azúcares reductores totales en jugos mezclados de caña de azúcar utilizando el método ácido 3,5 dinitrosalicílico. *ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar*, 15(2), 45-50.
- Feng, S., Luo, Z., Tao, B., & Chen, C. (2015). Ultrasonic-assisted extraction and purification of phenolic compounds from sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) rinds. *LWT Food Science and Technology*, 60(2), 960-976. doi: <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2014.09.066>
- Gálvez Ranilla, L., Kwon, Y. I., Genovese, M. I., Lajolo, F. M., & Shetty, K. (2008). Antidiabetes and antihypertension potential of commonly consumed carbohydrate sweeteners using in vitro models. *Journal of Medicinal Food*, 11(2), 337-348. doi: <http://doi.org/10.1089/jmf.2007.689>
- García, J. M., Narváez, P. C., Heredia, F. J., Orjuela, Á., & Osorio, C. (2017). Physicochemical and sensory (aroma and colour) characterisation of a non-centrifugal cane sugar ("panela") beverage. *Food Chemistry*, 228(1), 7-13. doi: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2017.01.134>
- Hamerski, F., Da Silva, V. R., Corazza, M. L., Ndiaye, P. M., & De Aquino, A. (2011). Assessment of variables effects on sugar cane juice clarification by carbonation process. *International Journal of Food Science + Technology*, 47(2), 422-428. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.2011.02857.x>
- Jaffé, W. R. (2012). Health Effects of Non-Centrifugal Sugar (NCS): A Review. *Sugar Tech*, 14(2), 87-94. doi: <https://doi.org/10.1007/s12355-012-0145-1>
- Larrahondo, J. E. (1995). Calidad de la caña de azúcar. En: *El cultivo de la caña de azúcar en la zona azucarera de Colombia* (pp. 337-354). Cali, Colombia: Cenicaña
- Martínez González, E., Wong Paz, J. E., Muñoz Márquez, D. B., & Reyes Luna, C. (2016a). Detección de los puntos críticos de control en la elaboración artesanal de Piloncillo. *TECTZAPIC, Revista Académico-Científica*, 2(3), 36-41.
- Martínez-González, E., Muñoz-Márquez, D., Reyes-Luna, C., Morales-Vázquez, I., & Wong-Paz, J. (2016b). Estudio de los factores que influyen en la producción de piloncillo de caña de azúcar. *Agronomía Colombiana*, 34(1), S668-S669.

- Mosquera, S. A., Carrera, J. E., & Villada, H. S. (2007). Variables that affect the quality of the processed panela in the department of Cauca. *Facultad de Ciencias Agropecuarias*, 5(1), 18-27.
- Mujica, M. V., 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.
- Okabe, T., Toda, T., Inafuku, M., Wada, K., Iwasaki, H., & Oku, H. (2009). Antiatherosclerotic functions of kokuto, Okinawan noncentrifuged cane sugar. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 57(1), 69-75. doi: <https://doi.org/10.1021/jf802796m>
- Plackett, R. L., & Burman, J. P. (1946). The design of optimum multifactorial experiments. *Biometrika*, 33(4), 305-325. doi: <https://doi.org/10.1093/biomet/33.4.305>
- Prada Forero, L. E., García Bernal, H. R., & Chaves Guerrero, A. (2015). Efecto de las variables de evaporación: presión y flujo calórico en la calidad de la panela. *Revista Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 16(1), 7-23. doi: https://doi.org/10.21930/rcta.vol16_num1_art:376
- Prada Forero, L. E., García Bernal, H. R., & Chaves-Guerrero, A. (2014). Efectos de la presión de evaporación y la concentración de antiespumante y del uso de floculante y coadyuvante en la calidad de la miel y la panela. *Revista Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 15(2), 153-172. doi: https://doi.org/10.21930/rcta.vol15_num2_art:356
- Ruge, R. I., & Pérez H. W. (2017). Diagnóstico tecnológico del uso de dispositivos programables en la industria boyacense. Caso de estudio: cadena agroindustrial de la panela. *Tecnura, Tecnología y cultura, afirmando el conocimiento*, 21(52), 130-147. doi: <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2017.2.a10>
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (Sagarpa). (2007). *Informe de evaluación estatal*. Programa de Desarrollo Rural. San Luis Potosí, México. (pp. 51-66).
- Solís-Pacheco, J. R., Pérez-Martínez, F., Orozco-Ávila, I., Flores-Montaña, J. L., Ramírez-Romo, E., Hernández-Rosales, A., & Aguilar-Uscanga, B. (2006). Descripción de un proceso tecnificado para la elaboración de piloncillo a partir de la caña de azúcar. *e-Gnosis [online]*, 4(1), 1-8.
- Teves, Y. K. L. (2016). Physicochemical characterization of muscovado sugar using different sugarcane varieties and standardized lime concentration. *MATTER: International Journal of Science and Technology*, 2(2), 1-18, doi: <http://dx.doi.org/10.20319/mijst.2016.22.0118>