

Efecto de las variables de evaporación: presión y flujo calórico en la calidad de la panela

Effect of the variables of evaporation: pressure and heat flux in the quality of panela

Luz Esperanza Prada Forero,¹ Hugo Reinel García Bernal,² Arlex Chaves Guerrero³

¹ Ingeniera Química, MSc. Investigador Corpoica Cimpa. lprada@corpoica.org.co

² Ingeniero Agrónomo y Agrícola, MSc. Consultor. hgarciab@yahoo.es

³ Ingeniero Químico, PhD. Docente Universidad Industrial de Santander. achacesg@uis.edu.co

Fecha de recepción: 05/11/2013

Fecha de aceptación: 17/07/2014

Para citar este artículo: Prada LE, García HR, Chaves A. Efecto de las variables de evaporación: presión y flujo calórico en la calidad de la panela. Corpoica Cienc Tecnol Agropecu. 16(1): 7-23

Abstract

In the industry of panela (called *uncentrifuged sugar* by the FAO), is estimated that multiple-effect evaporators (EME), allow greater control and increases by 36 % the overall efficiency of process. However, the implementation of these technologies requires the technical adjustment of the process; it keeps the quality of panela obtained in open systems evaporation too. Condition has unveiled a technological gap with respect to influence of the complex reactions that occur during water evaporation and concentration of sugars on the characteristics of sugar cane and brown sugar. To fill part of this technological gap, the objective of the work presented here was determine the effect of the variables of evaporation, pressure and heat flux on the quality of sugar cane and the panela. To achieve this, it worked one experimental design, completely at randomized with 4x3 factorial arrangement, four repetitions and the variety of cane CC 85-46, without flocculant, adjuvant or antifoam. The results showed that heat flow densities of 17 kW/m² and pressurized systems, adversely affect quality of panela in areas such as color, pH, glycoside and solidification rate, to the point of not meeting the requirements of resolution 779 of the Colombian Ministry of Social Protection from sucrose and reducing sugars.

Key words: Multiple-effect evaporator, process panela, sugar cane, judger cane, uncentrifuged sugar

Resumen

En la industria de la panela (denominada *azúcar sin centrifugar* por la FAO), se estima que los evaporadores de múltiple efecto (EME), permiten un mayor control e incrementan en un 36 % la eficiencia global del proceso. No obstante, la implementación de estas tecnologías requiere que, además del ajuste técnico del proceso, también se mantenga la calidad de la panela obtenida en los sistemas de evaporación abierta. Condición que ha develado un vacío tecnológico respecto a la influencia de las complejas reacciones que ocurren durante la evaporación y concentración del jugo sobre las características de la miel de caña y la panela. Con el fin de llenar parte de este vacío tecnológico, el objetivo del trabajo aquí presentado fue determinar el efecto de las variables de evaporación: presión y flujo calórico sobre la calidad de la miel de caña y la panela. Para lograrlo, se trabajó un diseño experimental completamente al azar con un arreglo factorial 4x3, cuatro repeticiones y la variedad de caña CC 85-46, sin floculante, coadyuvante, ni antiespumante. Los resultados mostraron que los sistemas presurizados y con densidades de flujo calórico bajo (17 kW/m²), afectan negativamente la calidad de la panela en aspectos como color, pH, índice glucósido y solidificación, hasta el punto de no cumplir con los requerimientos de la Resolución 779 del Ministerio de Protección Social colombiano respecto a sacarosa y azúcares reductores.

Palabras claves: Evaporador múltiple efecto, proceso panelero, miel de caña, jugo de caña, azúcar sin centrifugar

Introducción

La producción de panela se inicia al decantar el jugo extraído de la caña de azúcar, con el fin de eliminarle las impurezas. Una vez libre de tierra y bagacillo, se aplica calor y se le adiciona un floculante y un corrector de pH. Antes de alcanzar la ebullición, algunas de las partículas coloidales dispersas en el jugo se coagulan. Estos coágulos, le aportan a la panela características no deseadas, por lo que, para removerlos por métodos físicos, se adiciona un floculante que los une en una nata llamada *cachaza*, la cual se retira manualmente con un cazo. El jugo clarificado, se continúa calentando, para evaporar cerca del 80% del agua y concentrar los azúcares hasta convertirlo en miel. Cuando esta alcanza entre 92 y 96 °Brix, se retira de la hornilla y se bate. Si el producto deseado es panela granulada, la miel se bate hasta su solidificación y granulación; mientras que, si se desea obtener panela en molde, entonces solo se realiza un leve batido hasta el cambio de textura y color, seguido del moldeo y enfriamiento de la miel hasta su solidificación (Prada et al. 2012).

En los últimos 30 años, la industria panelera colombiana ha mejorado su proceso y logrado reducciones de hasta el 37% en sus costos de producción, de forma que entre los años 1984 y 1998 obtuvo una tasa de retorno de la investigación del 76% y beneficios de \$92.000 millones. Entre estas mejoras se encuentran las hornillas de evaporación abierta, con menor emisión de contaminantes y mayor eficiencia energética (Rodríguez y Gottret et al. 2004). No obstante, en estas hornillas se requiere un nuevo enfoque tecnológico, ya que en ellas aún existe una significativa pérdida energética, calculada en 15.337 TJ de vapor por año de producción. Una de las formas de mejorar significativamente estas pérdidas, es la evaporación de múltiple efecto, con la cual se ha demostrado que se puede incrementar en un 36% la eficiencia global del proceso, así como un mejor control del mismo (Durán 2010).

Un evaporador múltiple efecto (EME) es un equipo utilizado en la industria alimenticia, compuesto de varios cuerpos llamados efectos. En el primero, se suministra calor de una fuente exterior y se opera a una temperatura de ebullición alta establecida por la presión del sistema. El vapor producido en este es entonces usado como medio de calentamiento del segundo; luego, puede ir a un tercer efecto para seguir el proceso o ir directamente a un condensador, si es doble. Cada efecto trabaja a una presión inferior a la del anterior, para garantizar que el vapor de

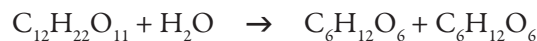
calentamiento se encuentre sobrecalentado con relación a la solución y lograr mantener un adecuado gradiente de temperatura; de esta forma, la solución alcanza temperaturas de ebullición inferiores en cada paso (Honig 1982).

Sin embargo, aun cuando el EME se implementó en el proceso azucarero desde mediados del siglo XX (Hugot 1963), para hacer posible la implementación del EME en la industria panelera, se debe lograr que el producto obtenido mantenga las características composicionales y organolépticas de los sistemas de evaporación abierta. Esta exigencia ha develado un vacío tecnológico.

Una de las causas de este vacío radica en asumirse que la concentración del jugo de caña es solo un problema de transferencia de calor y no considerar que la miel y la panela mantienen la mayoría de los elementos constitutivos del jugo de caña (*Saccharum Officinarum* L.) y los de sus reacciones (Codex 2011) y, por ende, su calidad se ve afectada por todos los fenómenos de naturaleza química y fisicoquímica que se presentan durante el proceso. Entre estos fenómenos, se encuentra una serie de importantes reacciones químicas dentro de las que sobresalen las de hidrólisis (Solís et al. 2006) y pardeamiento no enzimático, específicamente las reacciones de Maillard y las de caramelización de algunos azúcares los cuales están determinados, entre otros factores, por la temperatura y la cantidad de energía suministrada al sistema (Honig 1982).

La hidrólisis o inversión, consiste en escindir la molécula de un disacárido disuelto en agua en los monosacáridos que la forman. En la calidad de la panela, la inversión de la sacarosa reviste especial importancia, ya que afecta los parámetros de solidificación, dureza, turbidez y color. Las soluciones de sacarosa se hidrolizan en cantidades iguales de los dos monosacáridos (α -glucosa y β -fructosa), según la reacción:

Ecuación 1



$[\alpha]_D^{20} + 66,53^\circ$ sacarosa $[\alpha]_D^{20} + 52,7^\circ$ glucosa $[\beta]_D^{20} - 92,4^\circ$ fructuosa

Sin embargo, se ha encontrado que las mieles contienen mayor cantidad de fructosa que de glucosa, debido a que esta última se destruye más rápidamente y el equilibrio entre los diferentes tautómeros se obtiene lentamente (Fernández 2005). Su energía de activación a 20 °C es

aproximadamente de 108,2 kJ y disminuye levemente cuando aumenta la temperatura (Honig 1982). La velocidad de inversión de la sacarosa, aumenta con la temperatura (Chem 1991) y el tiempo de residencia (Jerez 2008); así mismo, la presencia de iones de hidrógeno, sales y ciertos fermentos con estructuras moleculares de glucosa y fructosa, catalizan la descomposición hidrolítica de la sacarosa disuelta (García 2007) y se han observado efectos inhibidores de algunos iones metálicos (Honig 1982).

Aunque los mecanismos de las reacciones de caramelización se han descrito mayoritariamente para temperaturas altas cercanas a las de fusión de los azúcares, este fenómeno también se presenta a bajas temperaturas y, a diferencia de las reacciones de Maillard, los reactivos de la caramelización son exclusivamente los azúcares y no requiere de soluciones concentradas (Zamora et al. 2011). Estas reacciones siguen dos posibles vías de degradación, las cuales dependen exclusivamente de los azúcares y del pH del sistema. Cuando se trata de disacáridos, debe existir una hidrólisis previa y una vez producidos los correspondientes monosacáridos, estos se transforman en enoles. Seguidamente, aparece una deshidratación del enol que produce derivados furánicos, los cuales finalmente se polimerizan dando lugar a pigmentos macromoleculares de sabores característicos y coloraciones pardas rojizas o cafés oscuras (Díaz y Clotet 1995).

Por otra parte, las reacciones de Maillard se presentan en soluciones concentradas, donde los azúcares reductores y un grupo amino libre proveniente de un aminoácido o de una proteína, producen melanoidinas a través de un complejo grupo de transformaciones autocatalíticas. Las reacciones de Maillard se pueden dividir en tres etapas: 1) una condensación aminoazúcar y posterior arreglo de Armadori, estos productos que apenas tienen color; 2) fragmentación y deshidratación de los azúcares formando las premelanoidinas y arreglo de Stercker; y 3) polimerización del aminoaldehído en melanoidinas que son pigmentos amarillos, pardos, cafés y negros que presentan una gran variación de aromas (García 2007). Si bien es cierto que los contenidos de aminoácidos presentes en la panela son tan solo del 1,5 al 5,5 %, bajo determinadas condiciones de proceso, las reacciones de Maillard se pueden presentar durante la evaporación y modificar las características de la panela (Rein 2012).

Aun cuando se conoce que en sistemas abiertos una baja densidad de flujo calórico, durante el proceso de

evaporación, afecta negativamente la consistencia y el color de la panela (Prada 2006) y que la temperatura tiene un efecto directo en la velocidad de pardeamiento producida en soluciones concentradas de carbohidratos, este conocimiento no es suficiente, ya que se desconoce cómo el flujo calórico y la temperatura de ebullición a presiones diferentes a la atmosférica afectan el color, la turbidez, la dureza y solidificación de la miel y la panela.

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, en relación a los beneficios energéticos que trae el uso de EME en la evaporación de los jugos de caña de azúcar y los riesgos relacionados a los cambios negativos en las características fisicoquímicas de la panela, este trabajo se enfoca en determinar el efecto de la presión y el flujo calórico suministrado durante el proceso de evaporación, sobre la calidad de la miel y la panela, específicamente sobre el pH, el color, la turbidez, la concentración de sacarosa azúcares reductores, sólidos solubles e insolubles y la solidificación.

Metodología

Para comprobar la hipótesis falsa: “La densidad de flujo calórico no afecta la calidad de la panela cuando el jugo se evapora a presiones diferentes a la atmosférica”, se estudió las variables de evaporación: presión y flujo calórico, mediante una metodología desarrollada en el laboratorio, basada en un diseño experimental completamente al azar con un arreglo factorial 4x3 y 4 repeticiones.

Durante la experimentación, se obtuvieron las muestras de mieles y panelas y en cada muestra se analizó fisicoquímica y organolépticamente las variables de calidad. Luego, los resultados experimentales se analizaron técnica y estadísticamente, comparando los datos de las muestras producidas a presiones diferentes a la atmosférica con los de las producidas en sistemas de evaporación abierta.

Variables

Se experimentó con tres valores de la variable flujo calórico de evaporación: 17,857, 23,809 y 27,778 kW/m². Estos valores se seleccionaron a partir de pruebas experimentales previas, llevadas a cabo con agua destilada; mientras que los cuatro valores trabajados para la variable presión del sistema, la seleccionaron con base en condiciones de laboratorio y criterios técnicos (tabla 1).

Tabla 1. Valores experimentales de la presión del sistema de evaporación

Presión (kPa)	Criterio de selección	Método de medición y control
Presurizado 103,392	Máxima presión alcanzada en laboratorio	Relacionado a temperatura de evaporación, regulado por la válvula de alivio
Atmosférico 89,878	Valor de la presión atmosférica	Relacionado a la altura (Bucaramanga, 959 msnm)
Vacío	35±5 Máximo vacío, prototipo EME Cimpa	Regulador y manómetro, de la bomba de vacío
	15±5 Máximo vacío, en laboratorio	

Las variables de respuesta analizadas fisicoquímicamente en miel y panela, así como el principio y la norma usada para su medición experimental, se listan en la tabla 2.

Tabla 2. Métodos de análisis de las variables de respuesta

Parámetro	Principio	Método adaptado de	Unidad de medida
Sólidos solubles	Refractométrico	Organización Internacional de Normalización (ISO) 1741 de 1980	°Brix
Potencial de hidrógeno	Potenciométrico	Norma de la Comisión Intenacional para la Unificación de Métodos de Análisis del Azúcar (ICUMSA) GS 1/2/3-1 de 1994	pH entre 4,5-7,0
Sacarosa	Polarimétrico	ICUMSA GS 1/2/3-5 de 1994	Porcentaje en peso (% _p)
Azúcares reductores	Volumétrico	Norma Técnica Colombiana (Icontec) NTC de 1779. Método Eynon-Lane	Porcentaje en peso (% _p)
Sólidos insolubles	Gravimétrico	Asociación de Análisis Químicos Oficiales (Aoac), 22020 de 1984, y 922 de 1990	Porcentaje en peso (% _p)
Turbidez	Fotométrico a 620 nm	ICUMSA GS 1-7 de 1994	Unidades ICUMSA* (IU _{turbidez})
Color	Fotométrico a 420 nm	ICUMSA GS 1-7 de 1994	Unidades ICUMSA* (IU _{color})

* Comité Internacional para la Uniformidad de los Métodos de Análisis del Azúcar
Fuente: Protocolos para análisis de panela Corpoica-Cimpa

Adicionalmente, el color se evaluó de manera subjetiva utilizando la escala Munsell, en los parámetros de saturación, matiz y brillo, y se evaluó organolépticamente el olor, sabor, brillo, apariencia, solidificación de la miel y dureza de la panela.

El grado de hidrólisis de la sacarosa, se determinó a partir del coeficiente glucósido o índice de glucosa, el cual permanece constante cuando no hay inversión y se incrementa al aumentar los azúcares reductores y disminuir la concentración de la sacarosa. El coeficiente glucósido se calculó con la ecuación 2.

Ecuación 2

Coeficiente glucósido = $\frac{\text{Azúcares reductores (\%)} }{\text{Sacarosa (\% Pol)}} 100$

Para evitar conclusiones erróneas acerca del comportamiento de la sacarosa o de los azúcares reductores a consecuencia del incremento de la concentración del jugo y de la posibilidad de registros erróneos de sacarosa, ocasionados por azúcares reductores que presentan

rotación química, se usaron las purezas de sacarosa (pureza Pol) y de reductores (también conocida como glucobrix o glucorate) y se asumió que la lectura de grados Brix, (contenido de sólidos solubles expresados como sacarosa) es igual al total de sólidos solubles contenidos en la miel. Estas purezas se calcularon usando las expresiones de las ecuaciones 3 y 4.

Ecuación 3

Pureza de sacarosa = $\frac{\text{Sacarosa Pol (\% p)}}{\text{Sólido solubles (°Brix)}} 100$

Ecuación 4

Pureza de reductores = $\frac{\text{Azúcares reductores (\% p)}}{\text{Sólidos solubles (°Brix)}} 100$

Para controlar los efectos de ruido que pudieran ser ocasionados por la selección de la caña y la preparación de la muestra, se fijaron las siguientes variables (tabla 3).

Tabla 3. Control de las variables de ruido en la selección y preparación de la muestra

Parámetro	Definición	Rango
Condiciones agroecológicas	Clima y características edáficas del sitio donde se cultiva la caña	Instalaciones Corpoica Cimpa
Manejo agronómico	Forma de riego y cosecha, tipo de siembra y manejo de pesticidas, fertilizantes y abonos	Recomendación Corpoica Cimpa
Índice de madurez	Cociente de la concentración de sólidos solubles de la caña (basales sobre apicales)	0,95 a 1,05
Acopio	Almacenamiento de la caña en un sitio seco y fresco	Máximo 2 horas
Extracción	Tipo de molino	R14
	Abertura de las mazas de entrada	13 mm
Prelimpieza	Filtración del jugo a la salida del molino	Tamiz Retsch 25

Equipos, instrumentos y utensilios

Para la simulación en el laboratorio del proceso de evaporación del jugo de caña a diferentes presiones, se diseñaron y montaron tres sistemas de evaporación bajo los criterios de la norma ISO 5725 (figura 1).

En los tres sistemas se utilizó una placa de calentamiento, un termómetro, un cronómetro, un recipiente contenedor para el jugo con una base de 0,16 m de diámetro y conexiones con cables y manguera flexibles y resistentes al vapor. Como contenedor del jugo en el sistema al vacío se usó un frasco tipo Erlenmeyer con tapón de polipropileno; en el sistema atmosférico, un vaso de

precipitado forma baja; y, en el sistema presurizado, un recipiente con cierre hermético exterior en acero inoxidable.

En la tapa del sistema presurizado se ubicaron en el manómetro, el termopar y las válvulas de seguridad, control y alivio, y en el tapón del sistema al vacío se ubicaron el manómetro, el termopar flexible y la trampa de vapor. Esta trampa se unió a un condensador en espiral de 0,25 m de longitud y un recolector de condensados, el cual, a su vez, se conectó al sistema regulador de vacío.

En la tabla 4 se muestran las especificaciones técnicas de los equipos utilizados para la experimentación.

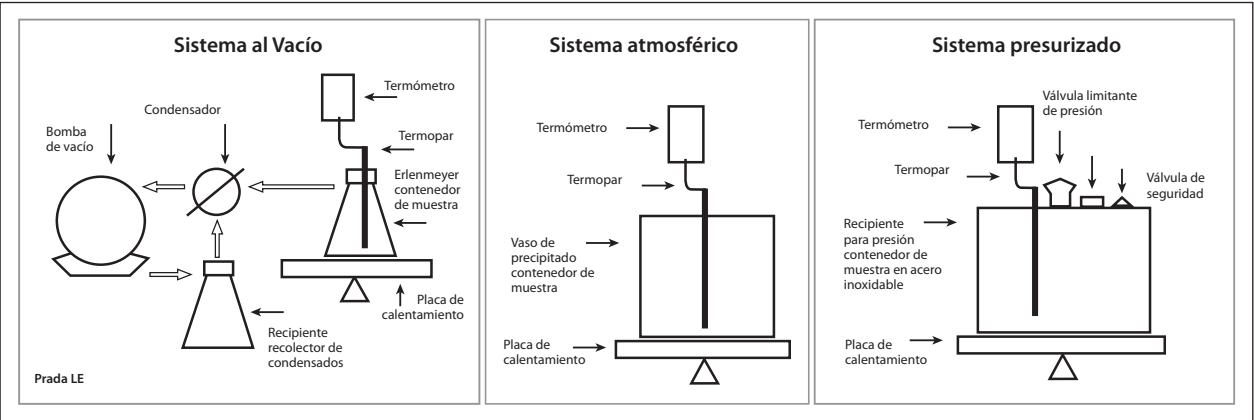


Figura 1. Sistemas experimentales de laboratorio para la evaporación del jugo de caña a diferentes presiones.

Tabla 4. Equipos e instrumentos utilizados en la experimentación

Equipo	Marca y Referencia	Descripción
Espectrofotómetro UV/VIS	Merck Spectroquam Pharo300	Rango espectral: 190 nm a 1100 nm; ancho de banda: 5 nm; haz: dividido en base de rejilla; detector: doble; sistema de ampliación: electrónico; lectura: digital; lámpara: tungsteno
Agitador con calefacción	Schott, SLR	Placas: vitrocerámica; potencia calentadora: ajustable, 24 divisiones; potencia máxima: 900 W; temperatura: 0 a 550 ±2 °C; zona calentamiento: φ 0,155 m; respuesta: 5/t99
Termómetro	Testo 925	Rango de temperatura: 20 a 120 ±0,05 °C; respuesta: 4/t99
Termopar	Testo 06005793	Tipo: K(NiCr-Ni), alambre flexible; diámetro: 0,003 m; largo: 0,55 m; clase: 1; temperatura: -200 a 1.100 ±0,1 °C; tiempo de respuesta: 0,1 s

(Continúa)

(Continuación tabla 4)

Equipo	Marca y Referencia	Descripción
Recipiente para presión	T-Type 3 L	Material: acero inoxidable; capacidad: 3 L; válvulas: seguridad, limitante de presión y control de flotación
Polarímetro	Atago Polax-D	Ángulo de rotación: -179,95° a 180,00 +0,10°; unidad mínima: 0,05°; lámpara: 589 nm, tubos de 100 mL
pHmetro	Schott	Capacidad: -2 a 20 +0,005 pH y -1.800 a 1.800 ±0,2 mV; temperatura de lectura -20 a 120 +0,2 °C; electrodo: bulbo de vidrio
Refractómetro Digital	Reichert	Rango de medición: 0,0-92,0 °Brix; menor lectura: 0,1 °Brix; precisión ±0,2 °Brix; temperatura de lectura: 10-75 °C; tiempo de respuesta 2 s
Balanza analítica	Sartorius-Mettler	Sistema: digital; capacidad máxima: 200 ±0,0001 g; amortiguación: interna de vibraciones; reproducibilidad: 0,00015 g; tiempo de respuesta: 0,1 a 5 s
Sistema de vacío para laboratorio	Ilmavac LVS 210T	Bomba: de membrana; vacío mínimo: 2 +2 kPa; trabajo: continuo; controlador: VCB 521 de 1 a 110 kPa; resistencia: productos químicos

Fuente: Ficha técnica de cada uno de los equipos

Selección y preparación de la muestra

Las pruebas de evaporación se realizaron sin antiespumante, con jugo de la variedad CC 86-45, clarificado sin floculante ni coadyuvante. Para simular las condiciones recomendadas por Corpoica Cimpa en el proceso de evaporación abierto y mantenerlas durante el transporte y almacenamiento, el jugo clarificado se preparó de la siguiente forma: el obtenido al pasar la caña por el molino se filtró con un tamiz analítico Retsch 25 (luz de malla de 710 μm) y se calentó a una velocidad de calentamiento de 1,5 °C/min hasta aproximadamente los 90 °C, se le retiró la cachaza rápidamente antes de alcanzar la temperatura de ebullición (aproximadamente a los 95 °C); después, el jugo se mantuvo en ebullición por dos minutos, se retiró del calor, se enfrió hasta los 35 °C, se pasó por un tamiz analítico Retsch 100 (luz de malla de 150 μm), se dosificó en porciones de 0,5 L en bolsas de PVC y se congeló.

Posteriormente, a partir de las unidades experimentales de 0,5 L de jugo clarificado y congelado se obtuvo cada una de las muestras requeridas por el diseño experimental. Para todas las muestras, el jugo se evaporó en el sistema de laboratorio correspondiente, hasta que la miel alcanzó

aproximadamente los 70 °Brix, entonces se retiró del calor y se dividió en dos partes. La primera, se almacenó para su posterior análisis fisicoquímico y, la segunda, se pasó a un vaso de precipitado de 0,5 L; se le adicionó 25 μL de antiadherente (aceite de palma refinado) y con una densidad de flujo calórico de 23,809 kW/m², se concentró hasta alcanzar los 115 °C, se retiró del calor y se batió hasta un cambio en el color y la textura de la miel, momento en el cual se moldeó. Una vez fría la panela se desmoldó y almacenó para su posterior análisis organoléptico y fisicoquímico.

Análisis estadístico

Para el análisis estadístico, se utilizaron los programas Excel Starter 2010 y SPSS 20.0. Las diferencias con los resultados del tratamiento de comparación y su significancia, se definieron por pruebas multivariadas y post hoc de Tukey, con intervalos de confianza del 95 %. La significancia se midió con probabilidades de rechazo de la hipótesis nula (α) menor de 0,05 y menor de 0,01 y el grado de dependencia lineal se determinó a través del coeficiente de determinación (R^2).

Resultados y discusión

Las variables de evaporación presión y densidad de flujo calórico afectan la concentración de sólidos solubles, el potencial de hidrógeno, el color y la turbidez y estos efectos son percibidos a través de las características físicas y organolépticas del producto.

Efecto sobre la concentración de sólidos solubles

En la figura 2, se graficó el glucobrix (parte superior) y la pureza Pol (parte inferior) contra el logaritmo de la concentración de sólidos solubles para las tres densidades de flujo calórico y las cuatro presiones estudiadas, las cuales mantiene la tendencia al extrapolar los datos hasta la concentración del jugo (inicial).

En ella, se confirma la hidrólisis de la sacarosa durante la evaporación, ya que, a medida que aumentó la concentración del jugo para producir la miel, aumentó el glucobrix y la pureza Pol. De esta forma y puesto que la concentración de sacarosa y azúcares reductores están directamente relacionados a la pureza Pol y el glucobrix respectivamente, se puede afirmar que la tendencia anterior es similar a la presentada para la inversión de la sacarosa en medio débilmente ácido (García 2007). También se encontró la relación inversa reportada en la literatura (Solís et al. 2006) entre la concentración de azúcares reductores y la dureza de la panela, sin embargo, no se puede afirmar que la concentración de azúcares reductores o el glucobrix, sea un factor determinante de la dureza, ya que algunas panelas presentaron similar contenido de estos pero difirieron en la dureza.

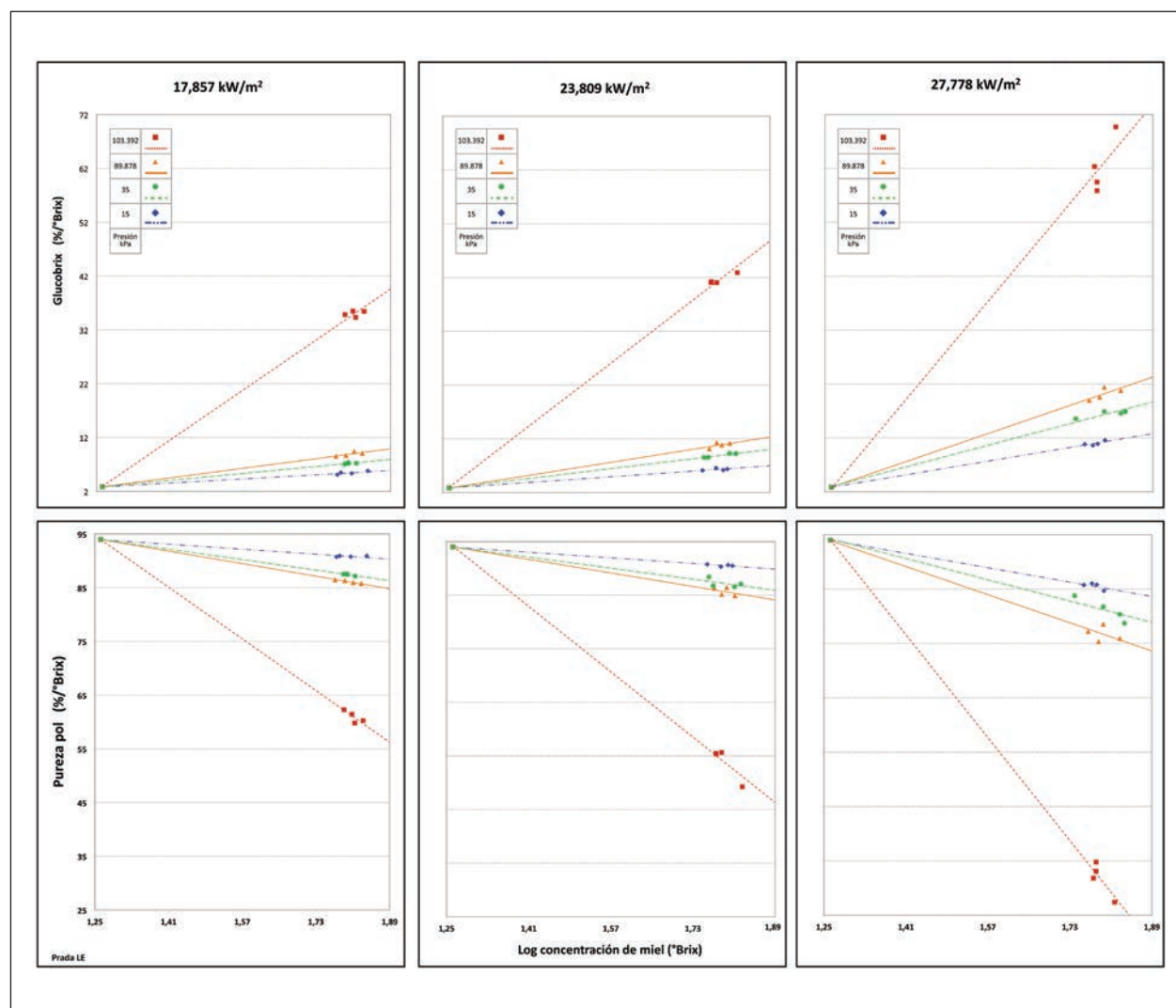


Figura 2. Efecto de la densidad de flujo calórico y la presión de evaporación sobre la pureza Pol y el glucobrix de la miel.

En la figura 3 se graficaron las curvas del coeficiente glucósido contra la concentración de sólidos solubles presentes en la miel, para los valores experimentales de presiones y flujo calórico. También en ella, el coeficiente glucósido aumenta al incrementarse logarítmicamente la concentración de la miel, con valores de R^2 entre 0,8995

y 0,9998 y presenta un comportamiento directamente proporcional a la presión e inversamente proporcional a la densidad de flujo calórico, confirmando así nuevamente la hidrólisis de la sacarosa. Esta tendencia se mantiene al extrapolar las curvas hasta el valor del coeficiente glucósido del jugo.

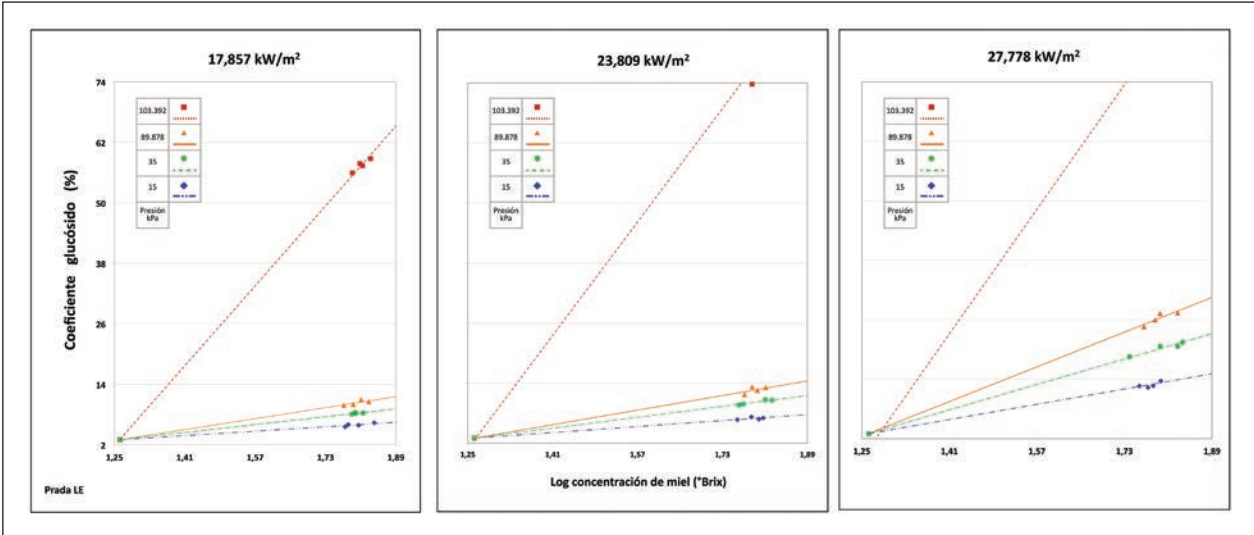


Figura 3. Efecto de la densidad de flujo calórico y la presión de evaporación sobre el coeficiente glucósido de la miel de caña a diferentes concentraciones.

En la figura 3 se aprecian altas diferencias entre los valores de coeficientes glucósidos alcanzados en los tratamientos del sistema presurizado y en los de densidades de flujos calóricos bajo ($17,857 \text{ kW/m}^2$). Es de resaltar que el coeficiente glucósido de la miel producida en sistemas presurizados alcanza valores que son mínimo cinco veces los valores alcanzados por las mieles obtenidas en los sistemas al vacío o atmosférico.

La tabla 5 muestra la influencia y la significancia estadística que presentan las variables presión y densidad de flujo calórico sobre el coeficiente glucósido, así como la dependencia que presentan entre sí cada uno de los tratamientos de dichas variables, a través de la formación de subconjuntos; resultados que confirman las observaciones realizadas en la figura 3.

Tabla 5. Resultados del análisis estadístico para determinar el efecto de la densidad de flujo calórico y la presión de evaporación sobre el coeficiente glucósido de la miel de caña

Variable de estudio	Influencia significancia	Subconjuntos homogéneos (dependencia)		
Presión	Influye significancia <0,01	103 kPa	89 y 35 kPa	15 kPa
Densidad de flujo calórico	Influye significancia <0,01	17 kW/m²	27 y 23 kW/m²	
Presión-flujo	Influye significancia <0,01			

En la figura 4 se graficó el coeficiente glucósido contra el flujo calórico para las mieles a 70 °Brix. Nuevamente se aprecia que el coeficiente glucósido de las mieles obtenidas en los tratamientos a alta presión alcanzan valores que son de tres a siete veces los valores alcanzados por las mieles producidas en sistemas abiertos, además, aunque sin confirmar, se puede apreciar una tendencia del coeficiente glucósido a disminuir en forma potencial a medida que aumenta el flujo calórico, con valores de R^2 entre 0,9792 y 0,9908.

Las observaciones anteriores permiten entender por qué las mieles del sistema presurizado presentan grandes diferencias en las características fisicoquímicas, entre las que se destaca el hecho de no alcanzar una apropiada solidificación. Es de resaltar que las panelas producidas a partir de mieles que presentaron valores de coeficientes glucósidos inferiores a 14% exhibieron buena consistencia y solidificación, mientras que las mieles con coeficiente glucósidos entre 14% y 28% produjeron panelas de consistencia blanda, y las mieles con coeficiente glucósido superior a 56% no lograron la solidificación.

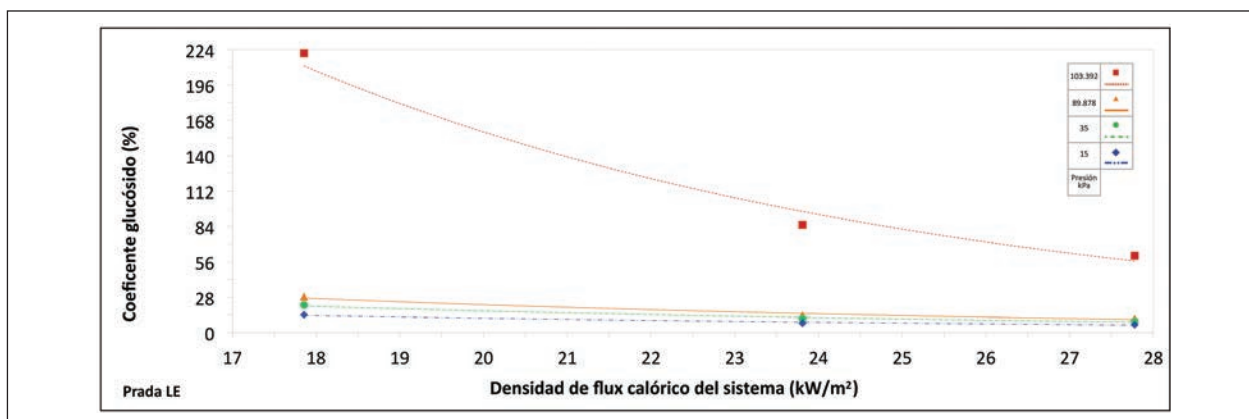


Figura 4. Efecto de la densidad de flujo calórico y la presión de evaporación sobre el coeficiente glucósido de la miel de caña de 70 °Brix.

Efecto sobre el potencial de hidrógeno

Como se aprecia en la figura 5, para los cuatro valores de presiones del sistema de evaporación y los tres valores de densidades de flujo calórico experimentados, las curvas

de pH muestran una relación inversa con el logaritmo de la concentración de sólidos solubles de la miel (°Brix) y la presión, con un valor de R^2 entre 0,9419 y 0,9981. Estas curvas, al ser extrapoladas, coinciden con el pH del jugo clarificado.

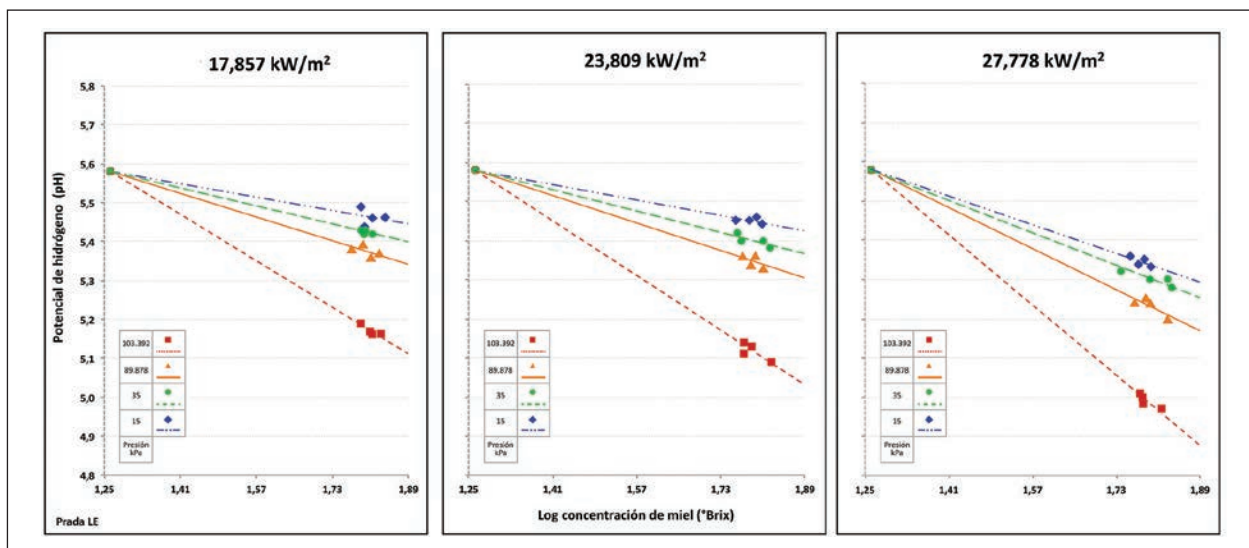


Figura 5. Efecto de la densidad de flujo calórico y la presión de evaporación sobre el potencial de hidrógeno de la miel de caña.

El proceso azucarero acepta un descenso del pH de hasta una unidad, siempre y cuando el pH de la miel no sea inferior a 6,0 (Rein 2012); en el proceso panelero aún no se ha definido el valor de esta disminución, pero se sabe que estos parámetros azucareros no son aplicables ya que cuando el jugo clarificado tiene un pH superior 5,7, se produce una panela oscura de baja aceptación (Ruiz 1998). Así mismo, cabe destacar que, en esta experimentación, las panelas producidas a partir de mieles

con pH inferiores a 5,3 presentaron problemas de dureza o no solidificaron.

En la figura 5 también se observa que, para cada presión estudiada, los valores del coeficiente glucósido forman un subconjunto y, en cada uno de ellos, los valores de cada densidad de flujo calórico forman tres subconjuntos, con lo que se corroboran los resultados del análisis estadístico resumido en la tabla 6.

Tabla 6. Resultados del análisis estadístico para determinar el efecto de la densidad de flujo calórico y la presión de evaporación sobre el potencial de hidrógeno de la miel de caña

Variable de estudio	Influencia significancia	Subconjuntos homogéneos (dependencia)			
Presión	Influye significancia <0,01	103 kPa	89 kPa	35 kPa	15 kPa
Densidad de flujo calórico	Influye significancia <0,01	17 kW/m ²	27 kW/m ²	23 kW/m ²	
Presión-flujo	No influye				

Cuando se fija la concentración de las mieles en 70 °Brix, y se grafican los valores del potencial de hidrógeno contra el log de la densidad de flujo calórico (figura 6), se observa para cada una de las cuatro presiones experimentales, una relación directa entre estas dos variables, con un valor de R² entre 0,9490 y 0,9997.

Este aumento del pH a medida que aumenta la concentración de la miel de caña, posiblemente tiene su origen en la formación de ácidos orgánicos producto de la degradación de los azúcares invertidos, la evaporación de compuestos amoniacales y la transición gradual de fosfato de calcio a fosfato tricálcico (Rein 2012).

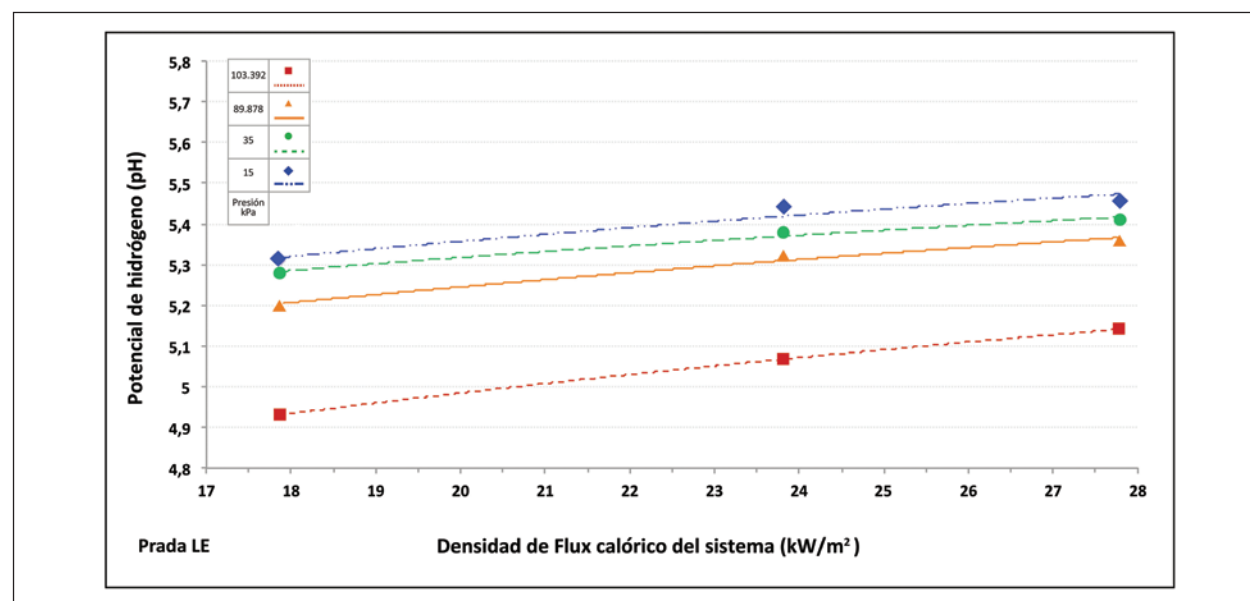


Figura 6. Efecto de la densidad de flujo calórico y la presión de evaporación sobre el pH de la miel de caña de 70 °Brix.

Adicionalmente, el aumento de la concentración de los iones de hidrógeno favorece la hidrólisis de la sacarosa y, por tanto, el aumento de la concentración de los azúcares reductores. Estas condiciones, que conjuntamente con el hecho de que exista una menor cantidad de agua a medida que se concentra la miel, proporcionan al final de la etapa de evaporación los entornos apropiados para que se presenten las reacciones de Maillard y aumente la disponibilidad de los grupos amino. En este proceso químico altamente complejo, no bien conocido, también se ejerce un bloqueo del grupo amino por los azúcares reductores, lo que aumenta la acidez y autocataliza esta reacción (Brumovsky 2012).

De igual forma, las reacciones de caramelización también son autocatalizadas por el aumento de la acidez (disminución del pH). Como además estos procesos de caramelización se ven favorecidos por las bajas densidades de flujo calórico, entonces la mayor cantidad de azúcares caramelizados y el menor valor pH de la miel, se obtienen en los tratamientos con mayor tiempo del proceso. Adicionalmente, el aumento de la presión produce un incremento de la acidez debido a la piezoelectricidad del agua (Díaz

y Clotet et al. 1995), por lo que las mieles producidas en sistemas presurizados, presentan una significativa reducción del pH.

Así, la temperatura de evaporación, la densidad de flujo calórico y el pH influyen significativamente en las proporciones y tipo de moléculas obtenidas durante la evaporación, lo cual causa las diferencias de aroma, sabor y propiedades organolépticas que se logran en el proceso panelero. Durante la experimentación, aquellas mieles que presentaron valores de pH entre a 5,3 y 5,5; produjeron una panela en molde con la dureza y color apropiados.

Efecto sobre el color

Los datos experimentales del color de la miel, contra el logaritmo de la concentración de los sólidos solubles presentes en ella, se graficaron en la figura 7, para los tres valores de densidad de flujo calórico y los cuatro valores de presiones de evaporación experimentados. El color se midió en unidades ICUMSA y la concentración de sólidos solubles en grados °Brix.

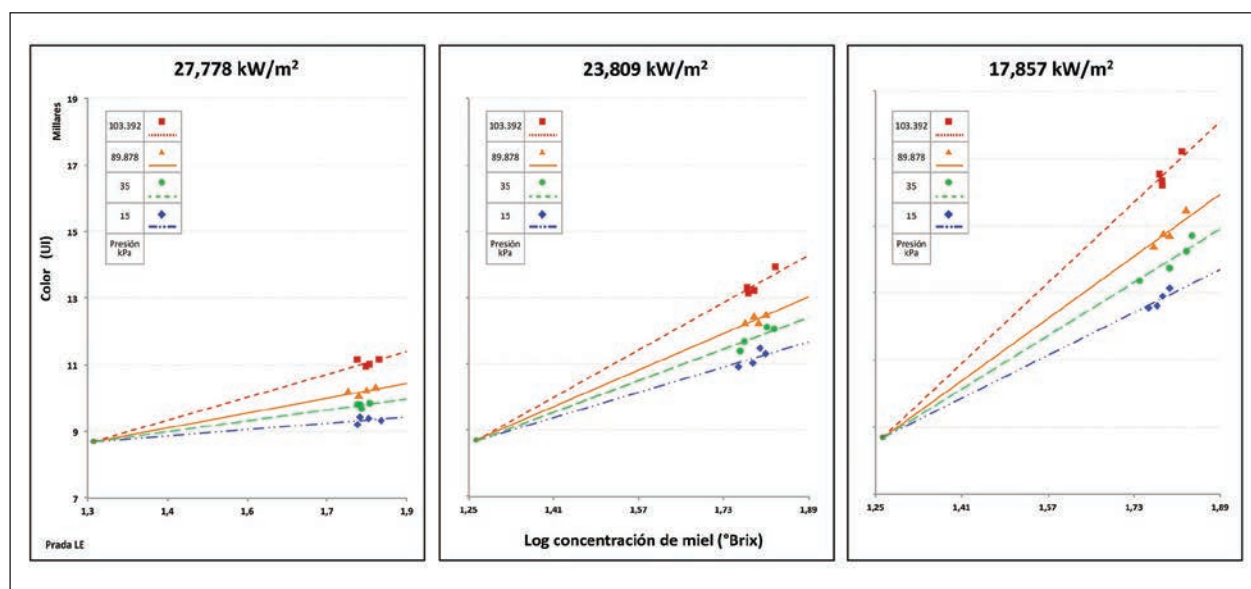


Figura 7. Efecto de la densidad de flujo calórico y la presión de evaporación sobre el color de la miel de caña.

De la gráfica 7, se puede observar que durante la evaporación del jugo de caña, el valor del color se incrementa al aumentar el logaritmo de la concentración de la miel, con un valor de R^2 entre 0,9351 y 0,9993. Además, el color presenta un comportamiento directamente proporcional a la presión del sistema e inversamente proporcional al

flujo calórico, tendencia que se mantiene al extrapolarse hasta el color del jugo clarificado. Este comportamiento es similar para cada presión y densidades de flujo calórico estudiados, cuyos valores difieren uno de otro; con lo que se corroboran los resultados del análisis estadístico (tabla 7).

Tabla 7. Resultados del análisis estadístico para determinar el efecto de la densidad de flujo calórico y la presión de evaporación sobre el color de la miel de caña

Variable de estudio	Influencia significancia	Subconjuntos homogéneos (dependencia)			
Presión	Influye significancia <0,01	103 kPa	89 kPa	35 kPa	15 kPa
Densidad de flujo calórico	Influye significancia <0,01	17 kW/m²	27 kW/m²	23 kW/m²	
Presión-flujo	Influye significancia <0,01				

La tendencia del color a aumentar a medida que crece la presión, encuentra una posible explicación en el hecho de que el jugo de caña es una disolución ácida de varios azúcares; los cuales presentan temperaturas de caramelización en medio ácido que probablemente van desde los 75 hasta los 160 °C (Díaz y Clotet 1995); de forma que al aumentar la presión del sistema, sube la temperatura de ebullición y, por tanto, la cantidad de azúcares que caramelizan, de forma que las mieles de los tratamientos presurizados presentaron los valores de color más altos y oscuros.

Por otra parte, el hecho de que el color aumenta a medida que disminuye el flujo calórico se puede explicar debido

a que al disminuir el flujo calórico el tiempo de evaporación y reacción aumenta y se favorecen las reacciones de caramelización de los azúcares, resultados que concuerdan con las observaciones hechas en la estación azucarera de Pasuruan (Java), entre 1927 y 1940 (Honig 1982). De forma que la mayor caramelización se presenta en las mieles de los tratamientos a 103,392 kPa y 17,857 kW/m². Para facilitar el análisis de esta información, se fijó la concentración de las mieles en 70 °Brix, y se graficaron los valores del color de la miel contra la densidad de flujo calórico, del sistema (figura 8). En ella se observa una relación inversamente lineal entre estas dos variables, para cada una de las cuatro presiones experimentales con un valor de R² 0,7900 a 0,9986.

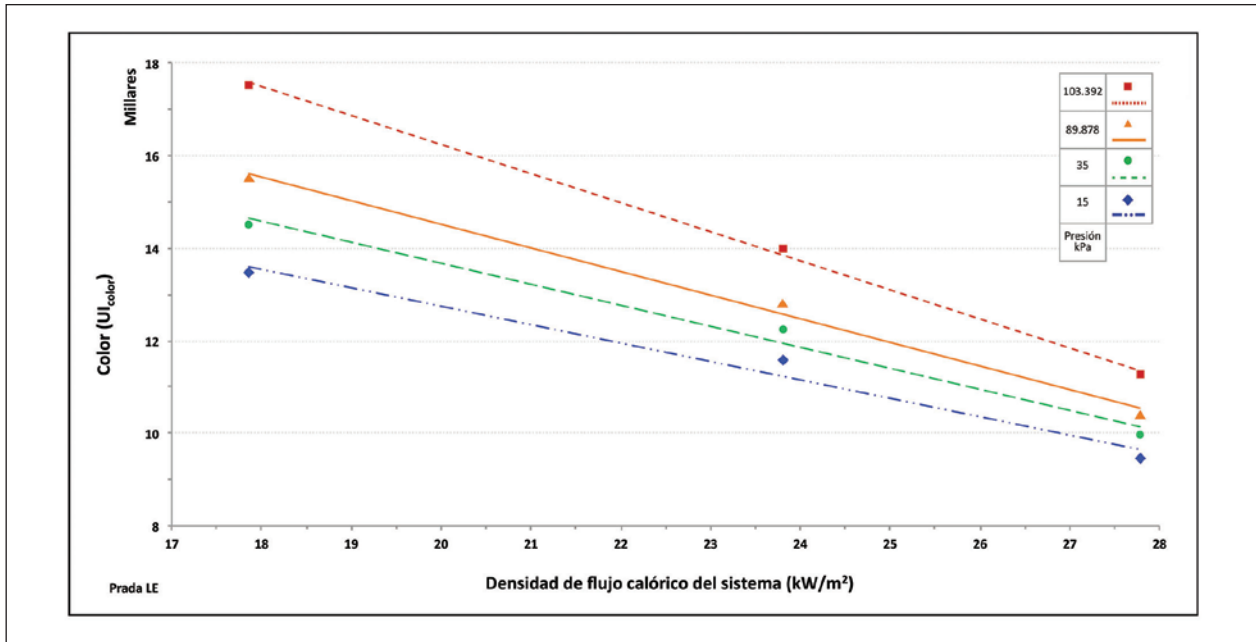


Figura 8. Efecto de la densidad de flujo calórico y la presión de evaporación sobre el color de la miel de caña a 70 °Brix.

Así, se puede afirmar que el grado de caramelización de los azúcares durante la evaporación, es proporcional a la presión, temperatura y tiempo de operación e inverso al flujo calórico.

Adicionalmente, la existencia de los múltiples compuestos y la baja estabilidad de estos compuestos hidrosolubles, también permite explicar la gran variación del color durante la evaporación del jugo y el almacenamiento de la panela.

Los compuestos, producto de las primeras etapas de las reacciones de Maillard que probablemente se presentan en la etapa final de la evaporación, están determinados por la temperatura, la fuerza iónica, la acidez y la interacción con otros radicales y moléculas complejas (Garzón 2008) y requieren de temperaturas menores a las de caramelización para producir las melanoidinas, sustancias altamente coloreadas que se ven favorecidas por tiempos de proceso prolongados.

Así mismo, los compuestos fenólicos, de hierro y los azúcares contenidos en el jugo de caña, forman sustancias altamente coloreadas en reacciones que se ven favorecidas por temperaturas superiores a 60 °C y tiempos de calentamiento prolongados, condiciones utilizadas en el proceso panelero.

Al analizar el color de la miel con la escala de Munsell, se encontró un tono de 2,5 YR (rojizas oscuras) para las mieles elaboradas en sistemas presurizados, 5 YR (amarillas rojizas) para las mieles del sistema abierto y 7,5 YR (amarillas claras) para los sistemas al vacío.

Cabe anotar que, aun cuando esta escala de medición del color es subjetiva y se realiza directamente en la muestra sin eliminar los sólidos insolubles, los resultados fortalecen la teoría sobre la caramelización de los azúcares en los sistemas de evaporación, principalmente en los presurizados, ya que la tonalidad de color rojiza que prima en estas muestras es una característica propia de los azúcares caramelizados (Díaz y Clotet 1995).

También se observa una relación directa entre la pureza del color y la concentración de la miel y un aumento de la intensidad del color en las mieles de los sistemas presurizados y al vacío. De forma que, las panelas de los sistemas de evaporación al vacío presentan coloraciones amarillentas y, las de los sistemas abiertos, tonalidad amarilla rojiza. Adicionalmente, la alta caramelización de las panelas producidas en sistemas presurizados le aporta un suave olor y sabor a panela quemada que difiere de los sabores característicos de la miel y la panela producida en los sistemas abiertos.

Efecto sobre la turbidez

En la figura 9 se observa que la turbidez de la miel reportada en unidades ICUMSA, presenta una tendencia a aumentar a medida que se incrementa el logaritmo de la concentración de sólidos solubles de la miel y un comportamiento inversamente proporcional a la densidad de flujo calórico, para las cuatro presiones y las tres densidades estudiadas, con valores de R^2 entre 0,8996 y 0,9923. Las curvas de turbidez mantienen su tendencia al ser extrapoladas hasta el valor de turbidez del jugo clarificado.

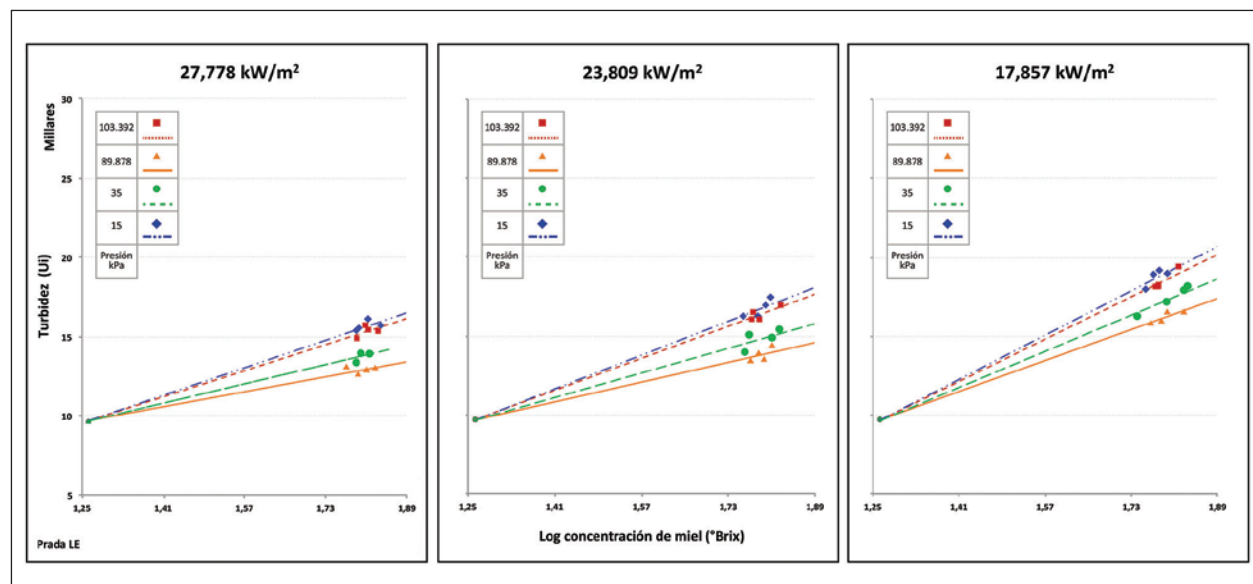


Figura 9. Efecto de la densidad de flujo calórico y la presión de evaporación sobre la turbidez de la miel de caña.

En la figura 9 también se puede apreciar que los menores valores de turbidez se obtienen en los sistemas a presión atmosférica y que las curvas forman tres subconjuntos de valores similares para cada densidad de flujo calórico, los cuales corroboran los resultados del análisis estadístico (tabla 8). Estos datos también presentan correlación entre la turbidez y el color de la panela, de forma que,

al elevar la primera, esta le proporciona a la miel, la panela y las bebidas con ella preparadas, una apariencia opaca y oscura, lo que afecta directamente la intensidad y la pureza del color y las bebidas, cuando sedimentan, presentan una pequeña cantidad de precipitado de color y una cachaza negruzcos sobrenadante en la superficie de la miel.

Tabla 8. Resultados del análisis estadístico para determinar el efecto de la densidad de flujo calórico y la presión de evaporación sobre la turbidez de la miel de caña

Variable de estudio	Influencia significancia	Subconjuntos homogéneos (dependencia)		
Presión	Influye significancia <0,01	103 kPa y 15 kPa	89 kPa	35 kPa
Densidad de flujo calórico	Influye significancia <0,01	17 kW/m ²	27 kW/m ²	23 kW/m ²
Presión-flujo	No influye			

Para visualizar con mayor claridad el efecto de la presión, se graficó la turbidez contra la presión de las muestras de miel con una concentración de 70 °Brix, para las cuatro presiones y tres densidades de flujo calórico estudiadas (figura 10). En ella se aprecia una posible tendencia poli-nómica de segundo grado con valores de R² entre 0,8814 y 0,9415, la cual requiere, para su comprobación, una mayor experimentación en valores cercanos a la presión atmosférica.

Para explicar este comportamiento, se debe considerar que el material iónico y coloidal (proteínas, silicatos y fosfatos de calcio, magnesio y hierro) presente en el jugo es el causante de la turbidez y que, al calentarse el jugo, se favorece la coagulación de este material, debido principalmente a la temperatura, por ende, a la energía cinética, el movimiento de las partículas y la presión del sistema, de forma que, al iniciarse el calentamiento durante la clarificación del jugo, algunas partículas coloidales forman complejos iónico-miscelares.

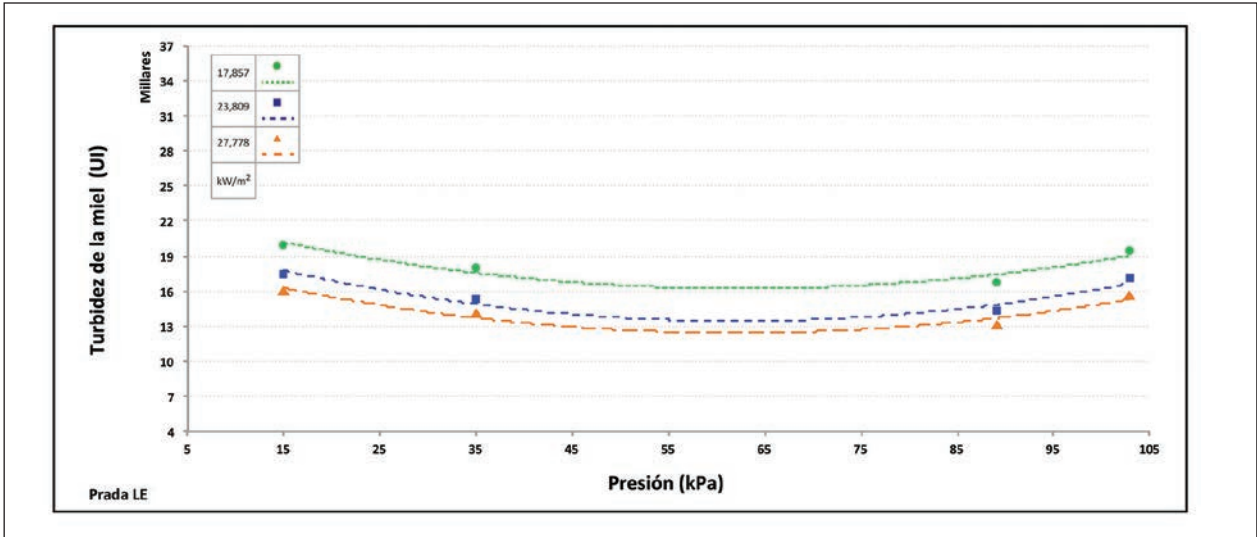


Figura 10. Efecto de la densidad de flujo calórico y la presión de evaporación sobre la turbidez de la miel de caña de 70 °Brix.

Algunos de estos complejos iónico-miscelares o coágulos, incrementan el contenido de sólidos insolubles al alcanzar el tamaño apropiado para precipitarse o flocular, de forma que se pueden remover por métodos físicos. Otros de estos complejos se redissuelven, y algunos no alcanzan el tamaño apropiado para precipitarse o solubilizarse por lo que incrementan la turbidez del jugo.

Posteriormente, durante la evaporación, las partículas no removidas continúan su proceso de coagulación, de forma que, cuando la evaporación se realiza al vacío, las temperaturas de ebullición y la energía suministrada es baja, lo que dificulta la formación de complejos de mayor tamaño y, por tanto, las mieles de estos sistemas presentan una mayor turbidez que las producidas a presión atmosférica. Pero si bien la temperatura facilita la coagulación, también puede contribuir a la descomposición del complejo iónico-miscelar debido a la fuerza y cantidad de choques entre las partículas, lo que explica la mayor turbidez de los tratamientos presurizados. Adicionalmente, el complejo iónico-miscelar durante el calentamiento absorbe agua y se hincha hasta reventar; de forma que el tamaño y la estabilidad de la miscela formada, depende de la capacidad que tienen las sustancias para absorber el agua y del tiempo de procesamiento (Zamora et al. 2011), razón por la cual, cuando la densidad de flujo calórico durante la evaporación es baja, se incrementa el tiempo de evaporación y la turbidez de la miel.

Por otra parte, al sedimentar las muestras de miel, se observó en el fondo un precipitado y en la superficie una cachaza sobrenadante. El volumen de la chaza es cinco veces el volumen del precipitado y las dos sustancias presentan una coloración negruzca. La cantidad de estas sustancias se deben a la falta de un floculante, lo cual conlleva una deficiente clarificación del jugo de caña.

Conclusiones

Se establecieron tres montajes, para simular en laboratorio la producción de panela a diferentes presiones en los cuales se utiliza un volumen de 0,5 L de jugo clarificado y presenta una repetitividad entre 87 % y 98 % y una precisión del 90 % a 98,7 % para las pruebas con agua y jugo.

Las panelas cuyas mieles fueron obtenidas en sistemas al vacío cumplen con los requerimientos fisicoquímicos

estipulados en la Resolución 779 del Ministerio de la Protección Social de Colombia y la NTC 1311; mientras que las obtenidas en el sistema presurizado no cumplen dichos requerimientos, ya que los contenidos de sacarosa y azúcares reductores se encuentran por debajo y por encima de la norma, respectivamente.

La evaporación del jugo de caña a presiones diferentes a la atmosférica modifica la calidad de la panela de la siguiente forma: a presiones menores a la atmosférica se incrementa la dureza, opacidad y turbidez y se disminuye el contenido de sólidos insolubles, el coeficiente glucósido y el color, con una tendencia hacia los tonos amarillos. A presiones mayores a la atmosférica se disminuye la dureza hasta el punto de no solidificar, se incrementa el brillo, la turbidez, el coeficiente glucósido y predomina el color oscuro en tonos rojizos.

Cuando el flujo calórico suministrado al sistema es bajo, se favorecen las reacciones de hidrólisis y PNE y se obtienen mieles opacas, turbias, con coloraciones oscuras en tonalidades cafés o negruzcas y las panelas producidas no logran una buena solidificación aún en los sistemas al vacío, características contrarias a las de las mieles producidas con un alto valor del flujo de calor.

Las mieles producidas con bajo flujo calórico ($17,857 \text{ kW/m}^2$) presentaron coeficientes glucósidos superiores al 14 % y panelas blandas, mientras que las mieles producidas en el sistema presurizado presentaron coeficientes glucósidos superiores al 28 % y no se logró la solidificación de la panela.

Para producir panela en EME (evaporadores múltiple efecto) —la evaporación se realiza a diferentes presiones—, el tiempo de residencia en los efectos presurizados debe ser solo el necesario para alcanzar valores de coeficiente glucósidos cercanos al 14 %, y en lo posible con una densidad de flujo calórico superior a 24 kWm^2 .

Agradecimientos

Los autores del proyecto presentan su agradecimiento a Corpoica y la UIS por el desarrollo del presente estudio, el cual hizo parte del proyecto Desarrollo de un Sistema de Evaporación y Concentración de Jugos de Múltiple Efecto para Mejorar la Eficiencia Térmica y la Productividad y Disminuir el Impacto Ambiental en la Producción de Panela, financiado por el MADR.

Referencias

- Alemania, Instituto Alemán de Normalización. DIN12-476, Aparatos de Vidrio de Filtración Embudos. Berlín, 2001 octubre.
- Brumovsky L. 2012. Pardeamiento enzimático. Posadas: Universidad Nacional de Misiones; [consultado 2012 nov]. <http://www.aulavirtual-exactas.dyndns.org/claroline/backends/download.php?url=L1BhcmRIYW1pZW50b0VuemltYXRpY28yMDEy-Q29sb3IucGRm&cidReset=true&cidReq=RICIONUTRI>.
- Chem J. 1991. Manual del azúcar de caña. 2.ª edición. México: Limusa.
- Díaz N, Clotet R. 1995. Cinética de la caramelización en soluciones azucaradas simples. *Alimentaria*. 32(259):35-38.
- Codex Alimentarius. 2011. Propuestas de un nuevo trabajo, norma técnica para la producción y comercialización de la panela para consumo humano. Roma: FAO; [consultado 2011 nov]. ftp://ftp.fao.org/codex/Meetings/CAC/cac34/cac34_09_Add1s.pdf.
- Durán E. 2010. Determinación de la eficiencia energética de un sistema de evaporación de múltiple efecto empleado en la concentración de jugos de caña panelera [trabajo de grado]. [Bogotá]: Fundación Universidad de América.
- Fernández JM. 2005. Estructura y función de los hidratos de carbono: azúcares, almidón, glucógeno, celulosa; [consultado 2009 ene]. <https://ferrusca.files.wordpress.com/2013/04/tema5-hidratos-carbono.pdf>.
- García D. 2007. Estudio cinético de la inversión de la sacarosa; [consultado 2009 abr]. <http://www.buenastareas.com/ensayos/Estudio-Cinetico-De-La-Inversion-De/5133110.html>
- Garzón G. 2008. Las antocianinas como colorantes naturales y compuestos bioactivos: revisión. *Acta Biol Colomb*. 13(3):27-36.
- Honig P. 1982. Principios de tecnología azucarera. Tomo III. 4.ª impresión. México: Continental.
- Hugot E. 1963. Manual para ingenieros azucareros. 6.ª impresión. México: Continental.
- Jerez LC. 2008. Control de inversión de la sacarosa en el proceso de elaboración del jarabe simple de bebidas carbonatadas [trabajo de grado]. [Guatemala]: Universidad de San Carlos.
- Prada LE, Sánchez Z, García HR, Rojas HS. 2012. Hornillas paneleras Ward-Cimpa: validación de los modelos matemáticos de diseño Corpoica-UIS. *Revista Fuentes*. 10(2):61-69.
- Prada L. 2006. La limpieza de los jugos un requisito indispensable para la calidad de la panela y de las mieles. *Revista Corpoica. Innovación y cambio tecnológico*. 4(1):12-19.
- Rein P. 2012. Ingeniería de la caña de azúcar. 2.ª edición. Berlín: Editorial Bartens.
- Rodríguez G, Gottret M. 2004. Aprendiendo del pasado para proyectarnos hacia el futuro: Adopción e impacto de la tecnología de panela en la hoya del río Suárez y Cundinamarca (Colombia). Palmira: CIAT-Corpoica; [consultado 2013 nov]. http://ciat-library.ciat.cgiar.org:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/5307/adopcion_impacto_panela.pdf?sequence=1.
- Ruiz C. 1998. Estudio del efecto del pH sobre la clarificación de jugos de tres materiales de caña mediante el uso de cal y bicarbonato de sodio como agentes alcalinizantes. Informe técnico. Barbosa: Corpoica-Cimpa.
- Solís J, Pérez F, Orozco I, Flores J, Ramírez E, Hernández A, Aguilar B. 2006. Descripción del proceso para la elaboración de piloncillo a partir de la caña de azúcar. *Gnosis*. 4(1):1-8.
- Zamora MM, Molina ME, Chacón G. 2011. Evaluación efecto de la temperatura, concentración y flujo volumétrico en la hidrólisis de la sacarosa mediante una invertasa inmovilizada en un reactor esférico. *Ingeniería*. 21(1):61-74.