AGROINDUSTRIA

ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA

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

Effects of evaporation pressure and antifoam concentration and the use of a flocculant and adjuvant on the quality of sugar honey and *panela*

Luz Esperanza Prada Forero[1], Hugo Reinel García Bernal[2], Arlex Chaves Guerrero[3]

[1]Ingeniera Química. MSc. Corpoica Cimpa, Barbosa, Colombia. lprada@corpoica.org.co
[2]I.A. MSc. Ingeniería Agrícola. Corpoica. Bogotá, Colombia, hgarciab@yahoo.es
[3]Ingeniero Químico. MSc. PhD. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. achacesg@uis.edu.co

Fecha de recepción: 05/11/2013
Fecha de aceptación: 13/01/2014

ABSTRACT

The implementation of multi-effect evaporators on *panela* (unrefined whole cane sugar) production process requires, besides the technological adjustment, to maintain product characteristics; this condition revealed the lack of knowledge of the effect of evaporation pressure on the quality of *panela*. In order to fill part of this gap, this study sought to determine the effect of both the concentration of antifoam and the use of a flocculant (*Heliocarpus popayanensis* Kunth) and an adjuvant (lime) on the quality of sugar honey and *panela*, when evaporation is performed at different atmospheric pressures. In order to achieve this, the present study worked on two completely randomized experimental designs with four replications, a density of evaporation heat flow of 27.78 kW/m^2 and juice from the CC85-46 variety. In the first design, two variables were studied: evaporation pressure and use of flocculant and adjuvant with a 4x2x2 factorial arrangement without antifoam. In the second design, variables evaporation pressure and quantity of antifoam with a 4x3 factorial arrangement without flocculant nor adjuvant were studied. The results show that the quality of the product deteriorates in pressurized systems (glucoside coefficient increases up to 200%), is not affected by the use of 50 µL of antifoam per liter of clarified juice and improved by the use of flocculant (turbidity is reduced by 55%). Solidification and hardness improve with the addition of the adjuvant, but this increased 48% color and 24% turbidity.

Key words: multiple-effect evaporator, *Heliocarpus popayanensis*, lime, foam.

RESUMEN

La implementación de evaporadores multiefecto en el proceso panelero requiere, además del ajuste tecnológico, mantener las características del producto; esta condición develó el desconocimiento del efecto de la presión de evaporación sobre la calidad de la panela. Para llenar parte de este vacío, se buscó determinar el efecto tanto de la concentración de antiespumante como del uso de floculante (*Heliocarpus popayanensis* Kunth) y coadyuvante (cal) sobre la calidad de la miel y la panela, cuando la evaporación se realiza a presiones diferentes a la atmosférica. Para ello, se trabajó en dos diseños experimentales completamente al azar, con cuatro repeticiones, una densidad de flujo calórico de evaporación de 27,78 kW/m^2 y jugo de la variedad CC85-46. En el primero se estudiaron las variables presión de evaporación y uso de floculante y coadyuvante, con un arreglo factorial de 4x2x2 y sin antiespumante. En el segundo, se estudiaron las variables presión de evaporación y cantidad de antiespumante, con un arreglo factorial de 4x3 y sin floculante ni coadyuvante. Los resultados permiten concluir que la calidad del producto se deteriora en sistemas presurizados (se incrementa el coeficiente glucósido hasta en 200%), no se afecta con el uso de hasta 50 µL de antiespumante por litro de jugo clarificado y mejora con el uso de floculante (se disminuye la turbidez en 55%). La solidificación y la dureza mejoran con el coadyuvante, pero este incrementa 48% el color y 24% la turbidez.

Palabras claves: evaporador multiefecto, *Heliocarpus popayanensis*, cal, espuma.

© 2014 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

p. 153-172

INTRODUCCIÓN

Aun cuando la industria panelera colombiana ha desarrollado tecnologías que la han llevado a convertirse en una de las pioneras mundialmente, todavía el proceso de evaporación se realiza en sistemas abiertos (Rodríguez *et al*., 2004) en más de 99,8% de los trapiches colombianos. Estos sistemas conllevan un consumo energético de 80% del consumo total de energía requerida en la hornilla (García *et al*., 2010) pues se debe concentrar el jugo de caña de 18 °Brix a mieles de 70 °Brix aproximadamente. Este consumo puede disminuirse al incorporar en el proceso panelero un sistema de evaporación de múltiple efecto (EME), sistema utilizado por la industria azucarera desde mediados del siglo XX (Honig, 1982).

El EME aprovecha la energía del vapor producido en el primer efecto, para llevar a evaporación el jugo contenido en el segundo efecto y así sucesivamente. En cada efecto se trabaja con una presión inferior a la del efecto anterior (Jayes, 2005), para garantizar que el vapor de calentamiento se encuentre sobrecalentado y alcance la temperatura de ebullición. Corpoica realizó una comparación de los gastos energéticos globales de los procesos de producción de panela con evaporación abierta y en el sistema de EME, encontrando que este último requiere solo 77% de la energía total requerida por un sistema abierto (Durán, 2010). No obstante, para su implementación, además del ahorro energético y económico, también se debe lograr que la panela allí producida mantenga las características composicionales y organolépticas de la producida en sistemas de evaporación abierta. Este requerimiento expuso el desconocimiento de algunos aspectos, como el efecto que tienen la cantidad de antiespumante y el uso del floculante y coadyuvante sobre las reacciones al evaporar el jugo a diferentes presiones.

Una de las causas de este vacío tecnológico se debe al hecho de asumir que el proceso de concentración del jugo de caña es solo un problema de transmisión de calor, ignorando el número sustancial de fenómenos de naturaleza química y física que tienen lugar (Honig, 1982) y que le aportan al producto características diferentes. Entre estos fenómenos se destacan las reacciones de hidrólisis y de pardeamiento no enzimático (PNE), específicamente las de caramelización de los azúcares y las de Maillard, altamente sensibles a las condiciones de operación y características de la materia prima.

Así, la limpieza del jugo es uno de los factores determinantes de la calidad y composición de la panela, ya que algunas de las sustancias que contiene el jugo de caña al salir del molino (agua y sustancias solubles, iónicas, coloidales, lodos y bagacillos) no son deseables en el producto final (Prada, 2006), pues incrementan el contenido de sólidos insolubles, la turbidez y el color. La limpieza de los jugos comprende las operaciones de prelimpieza y clarificación. La prelimpieza se realiza en el jugo frío y busca eliminar por diferencia de gravedad las sustancias más grandes como los lodos y bagacillos. En la clarificación se calienta el jugo en la hornilla y las partículas iónicas y coloidales como almidón, ceras y grasas se coagulan y floculan facilitando su remoción por métodos físicos.

Durante la coagulación las sustancias coloidales sufren un cambio físico por la acción de un agente químico o físico y se agregan o solidifican en pequeños coágulos. Entre los agentes coagulantes de tipo químico se encuentran sales minerales o metálicas, ácidos, alcoholes y electrólitos; y entre los de tipo físico, el más importante es el calor, aunque no realiza coagulaciones completas. En el proceso panelero se recomienda trabajar con cal o bicarbonato (Ruiz, 1998) y con velocidades de calentamiento superiores a 1,5 °C/min. La cal se utiliza por su facilidad de adquisición y manipulación; pero debido a su baja solubilidad se debe emplear solo la lechada obtenida al disolver 0,150 kg de cal en un litro de agua (Prada, 2006).

Una de las principales diferencias en la producción de mieles en la industria panelera y azucarera es el pH del jugo y el tipo de floculante utilizado durante la clarificación. El proceso azucarero trabaja con pH superiores a 7 y con floculantes químicos, mientras el proceso panelero utiliza pH cercano al punto isoeléctrico alrededor de 5,7 y disolución del floculante natural, como balso (*Heliocarpus popayanensis* HBK), cadillo (*Triumfetta affin mollissima* HBK) y guásimo (*Guazuma Ulmifolia* L).

La industria panelera trabaja alrededor del punto isoeléctrico del jugo para asegurar el equilibrio de los azúcares (sacarosa y reductores), pues a pH mayores de 7 existe mayor coagulación de las partículas iónicas, pero menor inversión de la sacarosa (Honig, 1982), adicionalmente se forman partículas café oscuro y negruzcas que le dan a la panela coloraciones oscuras poco apetecidas por el consumidor. A pH menores de 5, se cataliza la hidrólisis química de la sacarosa, debido a

que los ácidos orgánicos de cadena corta presentes en el jugo favorecen las reacciones de caramelización y Maillard, las cuales a su vez incrementan la concentración de iones hidronio, creando así un círculo autocatalítico, favorecido por la temperatura (García, 2007), razón por la cual se afecta negativamente la dureza y solidificación de la panela.

La adición del floculante, durante la clarificación, permite la aglomeración de partículas coaguladas en flóculos de mayor tamaño y peso molecular (Rein, 2012), formando la cachaza que al aumentar su consistencia facilita su remoción por métodos físicos como el cazo. Los mucílagos naturales utilizados en el proceso panelero, como floculantes, presentan gran afinidad por las superficies sólidas y están compuestos de mucopolisacáridos que pertenecen al grupo de los polímeros parietales de las plantas, principalmente de maltosa, fructosa y glucosa; contienen además saponinas, fenoles y elementos minerales como hierro, calcio y fósforo (Acero *et al*., 2001). Corpoica-Cimpa recomienda utilizarlos disgregados en agua, hasta formar una disolución de 0,006 Pa·s aproximadamente (parecida a la clara del huevo). De esta disolución se agrega al jugo un volumen igual a 2,5% del volumen del jugo, en dos aplicaciones, a 50 y 85 °C aproximadamente. En estas condiciones de uso se disminuye en 36% el contenido de sólidos insolubles en la panela (Prada, 2006); usar un exceso de disolución presenta problemas en la dureza y consistencia de la panela (Prada, 2002).

Con la ebullición del jugo se inicia la formación de la espuma, pues el incremento de la temperatura favorece algunas reacciones químicas que liberan gas, el cual junto con el vapor producido durante la evaporación forma burbujas, que debido a la diferencia de densidad ascienden y quedan encapsuladas en la película de la capa superficial del jugo. Esta película es sometida a esfuerzos de estiramiento hasta su rompimiento, de forma que la persistencia de la burbuja aumenta a medida que disminuye la tensión superficial. Como el jugo de caña no es un líquido puro, sino una disolución que contiene baja concentración de sustancias como fosfolípidos, grasas y proteínas, las cuales son surfactantes (poseen un grupo hidrófilo y uno hidrófobo o lipofílico), al absorberse estas sustancias en la superficie producen un descenso de la tensión superficial, las burbujas al llegar a la superficie del jugo se amontonan unas sobre otras y forman la espuma cuya existencia se rige por el mecanismo Gibbs-Marangoni (Hernández, 2003).

Una vez formada la espuma comienza su degradación, debido a la segregación gravitacional de las burbujas, al drenaje gravitacional del líquido, la succión capilar de la burbuja y la difusión gaseosa intraburbuja. La persistencia de la espuma se ve favorecida por el aumento de la viscosidad y de la concentración de las sustancias surfactantes. Así, el aumento de la viscosidad reduce la rapidez del drenaje hidrodinámico de las películas relativamente gruesas (espuma recién formada). El aumento de la concentración de las sustancias surfactantes favorece la persistencia pero solo hasta alcanzar la concentración micelar crítica. En este momento, debido al mayor grosor de la película, comienza un lento descenso del tamaño de las burbujas y por ende de la espumabilidad (Salager *et al*., 2010). Así, en el proceso panelero al inicio de la evaporación, el volumen de la espuma puede alcanzar hasta seis veces el volumen del jugo, y al finalizarla (aproximadamente 70 °Brix) e iniciarse la concentración, solo alcanza una décima parte del volumen de la miel.

Para disminuir la formación de espuma durante la evaporación, existen varias técnicas físicas y químicas. Algunas técnicas físicas son los métodos térmicos, electrónicos, mecánicos y el de oscilación de presión. Una técnica química es usar compuestos tensoactivos sin propiedades estabilizadoras que realizan cambios químicos en la capa de adsorción, dando una nueva estructura (Alva, 2005). En el proceso panelero, la normatividad colombiana permite con este fin el uso de grasas y aceites vegetales grado alimenticio (Minprotección, 2006).

El aceite de palma refinado, blanqueado y desodorizado (RBD) es económico y de fácil consecución y además actúa como antiadherente durante la concentración, para evitar que la miel se queme. Este aceite es insoluble en el jugo, tiene densidad y tensión superficial significativamente inferiores a las del jugo, por lo que flota, y se requieren concentraciones solo del orden de partes por millón para esparcirse sobre toda la superficie; está compuesto básicamente de ácido palmítico (C16:0), por lo que al compararlo con otros aceites alimenticios contiene una proporción de ácidos grasos saturados relativamente alta (45% - 55%) y de ácidos grasos poliinsaturados (9% - 12%) relativamente baja; características que le confieren durante el tratamiento térmico un punto de humeo superior a 230 °C y por tanto buena resistencia a la oxidación (FAO, 1993). Sin embargo, se debe tener presente que estos aceites se deterioran por las altas temperaturas (Valenzuela *et al*., 2003)

© 2014 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

y las trazas de cobre y hierro (Álvarez, 2005) del jugo de caña, cuyas proporciones dependen de la variedad de caña, las condiciones agroclimáticas y la edad del cultivo (Rein, 2012).

Considerando los beneficios energéticos del uso del EME así como la complejidad y el poco conocimiento que se tiene de los efectos tanto de los mecanismos de espumado como de las reacciones que ocurren durante la evaporación, esta investigación buscó determinar el efecto de la concentración del antiespumante (aceite de palma) y del uso del floculante (balso) y el coadyuvante (cal) sobre la calidad de la panela, cuando el jugo de caña se evapora a presiones diferentes a la atmosférica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se desarrollaron en laboratorio dos metodologías, cada una con su respectiva hipótesis y su propio diseño experimental completamente al azar y con arreglo factorial. Cada diseño se trabajó en dos etapas: en la primera de experimentación con cuatro repeticiones, se obtuvieron las muestras de mieles y panelas y se analizaron fisicoquímica y organolépticamente las variables de calidad en cada muestra; en la segunda, se analizaron técnica y estadísticamente los resultados experimentales. Las muestras producidas a presiones diferentes a la atmosférica se analizaron y compararon con los datos experimentales de las producidas en sistemas de evaporación abierta.

Variables

Para la comprobación de la primera hipótesis: "El uso del balso y la cal como floculante y coadyuvante de clarificación, respectivamente, no afecta la calidad de la panela cuando el jugo se evapora a presiones diferentes a la atmosférica", se trabajó un factorial de 4x2x2, para cuatro valores de presión del sistema de evaporación (presurizado de 103,392 ± 5 kPa, atmosférico 89,878 kPa y vacío de 15 ± 5 y 35 ± 5 kPa) y cuatro modalidades de uso del floculante y coadyuvante (tabla 1).

Tabla 1. Combinaciones de las modalidades de uso de floculante y coadyuvante experimentadas

Adición de floculante (disolución de balso)	Adición de coadyuvante (disolución de cal)
0	0
2,5% del volumen del jugo	0
0	Hasta alcanzar un pH de 5,7 en el jugo clarificado
2,5% del volumen del jugo	Hasta alcanzar un pH de 5,7 en el jugo clarificado

Para comprobar la segunda hipótesis: "La cantidad de antiespumante no afecta la calidad de la panela cuando en el jugo se evapora a presiones diferentes a la atmosférica", se trabajó un factorial de 4x3, para los cuatro valores de presión anteriormente mencionados y tres valores de la concentración del antiespumante (0, 50 y 4000 μL/L de jugo clarificado). El valor de 50 μL/L de jugo clarificado corresponde a la cantidad empleada normalmente en el trapiche y el valor de 4000 μL/L de jugo clarificado corresponde a adicionar 80 veces el volumen de antiespumante normalmente empleado en trapiche. Este último es el valor mínimo, que permitió cuantificar las diferencias en las variables de calidad durante la experimentación y que puede ser utilizado en el trapiche.

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 Internacional para la Unificación de Métodos de Análisis del Azúcar (ICUMSA) GS 1/2/3-1,1994	pH entre 4,5 - 7,0
Sacarosa	Polarimétrico	ICUMSA-GS1/2/3-5 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), 22.020 de 1984, y 922 de 1990	porcentaje en peso (%p)
Turbidez	Fotométrico a 620 nm	ICUMSA-GS1-7,1994	Unidades ICUMSA* ($IU_{turbidez}$)
Color	Fotométrico a 420 nm	ICUMSA-GS1-7,1994	Unidades ICUMSA* (IU_{color})

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

Adicionalmente, se evaluó el color según la escala Munsell en los parámetros de saturación, matiz y brillo y 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. 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, se utilizaron las purezas de sacarosa (pureza Pol) y de azúcares reductores (glucobrix o glucorate); estas se calcularon usando las siguientes expresiones:

Ecuación 1

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

Ecuación 2

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

Ecuación 3

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

p. 153-172

© 2014 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

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 los apicales).	0,95 a 1,05
Acopio	Almacenamiento de la caña en un sitio seco y fresco.	máximo 2 horas
Extracción	Tipo de molino y abertura de las mazas de entrada	R14 y 13 mm
Prelimpieza	Filtración del jugo a la salida del molino.	Tamiz Retsch 25

Equipos, instrumentos y utensilios

Durante la experimentación para simular en laboratorio la 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 que se empleó una placa de calentamiento, un termómetro y un cronómetro:

Sistema al vacío: se usó un frasco para vacío, tipo erlenmeyer de 2 L, con tapón, donde se ubicaron el manómetro, el termopar flexible y la trampa de vapor. La 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. Las conexiones se hicieron con manguera flexible para vapor a fin de permitir el movimiento.

Sistema a presión atmosférica: se usó un vaso de precipitado de 2 L.

Sistema presurizado: se usó un recipiente de acero inoxidable con cierre hermético exterior de 2 L, en cuya tapa se ubicaron el manómetro, el termopar y las válvulas de seguridad, control y alivio.

p. 153-172

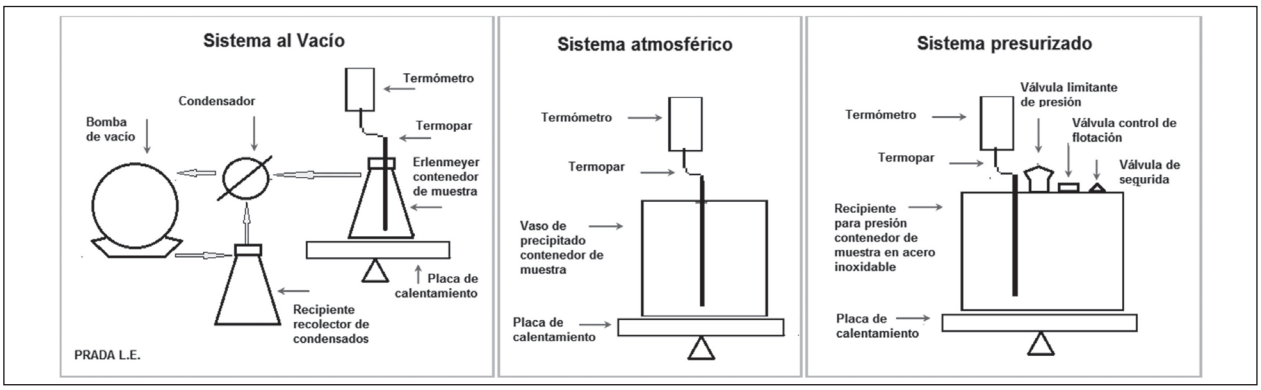

Figura 1. Sistemas experimentales de laboratorio para la evaporación del jugo de caña a diferentes presiones

Para la experimentación se usaron equipos cuyas especificaciones técnicas se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Equipos e instrumentos utilizados en la investigación

Equipo	Marca y referencia	Descripción
Espectro fotómetro UV/VIS	Merck Spectroquam Pharo 300	Rango espectral: 190 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 ºC, respuesta: 4/t99
Termopar	Testo 06005793	Tipo: K(NiCr-Ni): alambre flexible, dimensión: 0,55 x 0,003 m, clase: 1, precisión ± 0,1 ºC, temperatura -200 a 1100 °C, respuesta 0,1 s
Recipiente para presión	T-Type 3L	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 -1800 a 1800 ± 0,2 mV, temperatura de lectura -20 a 120 ± 0,2 °C, electrodo: bulbo de vidrio
Refractómetro digital	Reichert	Rango de medición: 0,0 a 92,0 ºBrix, menor lectura 0,1 ºBrix, precisión ± 0,2 ºBrix, temperatura de lectura 10 a 75 ºC, respuesta 2 s
Balanza analítica	Sartoriu-Mettler	Digital, capacidad máxima: 200 ± 0,0001 g, amortiguación: interna de vibraciones, reproducibilidad: 0,00015 g, respuesta 0,1 a 5 s.
Sistema de vacío para laboratorio	ILMAVAC LVS 210T	Bomba: de membrana, vacío mínimo: 2 ± 2 mbar, controlador: continuo de vacío VCB 521 de 1 a 110 mbar, resistencia: productos químicos y trabajo continuo.

Fuente: Ficha técnica de cada uno de los equipos.

p. 153-172

© 2014 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

p. 153-172

Selección y preparación de la muestra

Las disoluciones floculante y modificadora de pH se prepararon conforme a las recomendaciones dadas por Corpoica-Cimpa (Prada, 2006). Las muestras de miel y panela se obtuvieron a partir del jugo extraído de la variedad de caña CC86-45. La clarificación del jugo se realizó para todos los tratamientos con un calentamiento constante de 1,5 °C/min. Según el tratamiento, el jugo se trató de la siguiente forma:

- Sin floculante y sin coadyuvante: se calentó y retiró la cachaza cuando el jugo alcanzó aproximadamente 90 °C (antes de la temperatura de ebullición).

- Con floculante y sin coadyuvante: se calentó hasta aproximadamente 50 °C, se adicionó de la disolución floculante un volumen igual a 1,5% del volumen del jugo, se homogenizó, se siguió el calentamiento sin agitación hasta alcanzar 80 °C, momento en el cual se retiró la cachaza negra y se adicionó una nueva dosis de la disolución floculante igual a 1% del volumen del jugo, se homogenizó, se calentó sin agitación hasta alcanzar aproximadamente 90 °C y se retiró la cachaza blanca.

- Coadyuvante: cuando alcanzó aproximadamente 85 °C, se ajustó el pH a 5,74 con una lechada de cal (0,15 kg de cal por litro de agua), se homogenizó, se calentó sin agitación hasta alcanzar 90 °C, se retiró la cachaza antes de la ebullición del jugo.

- Con floculante y coadyuvante: se calentó hasta aproximadamente 50 °C, se adicionó de la disolución floculante un volumen igual a 1,5% del volumen del jugo, se homogenizó, se siguió el calentamiento sin agitación hasta alcanzar los 80 °C, momento en el cual se retiró la cachaza negra y se le adicionó un volumen de la lechada de cal igual al empleado en el ajuste de los jugos con coadyuvante y una nueva dosis de la disolución floculante igual al 1% del volumen del jugo, se homogenizó, se calentó sin agitación hasta alcanzar aproximadamente 90 °C y se retiró la cachaza blanca.

Una vez retirada la cachaza en cada tratamiento, el jugo se dejó calentar por dos minutos más, luego se retiró del calor, se enfrió hasta 35 °C, se pasó por un tamiz Retsch 100 y se dosificó y congeló en porciones de 0,5 L en bolsas de PVC.

La evaporación del jugo se realizó en el sistema de presión requerido conforme al diseño experimental, con una densidad de flujo calórico constante de 27,78 kW/m^2; para la obtención de cada muestra se utilizó una unidad experimental de 0,5 L de jugo clarificado y congelado.

Una vez la miel alcanzó los 102 °C, se retiró del calor y se dividió en dos porciones. La primera porción de miel se almacenó para su posterior análisis fisicoquímico y organoléptico. La segunda porción se pasó a un vaso de precipitado de 0,5 L, se le adicionó 25 µL de antiadherente (aceite de palma RDB) y con una densidad de flujo calórico de 23,78 kW/m^2 se concentró hasta alcanzar 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 almacenó para su posterior análisis fisicoquímico y organoléptico.

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 multivariables y de Tukey, con intervalos de confianza de 95%. La significancia se midió con probabilidades de rechazo de la hipótesis (α) menor de 0,05 y menor de 0,01 y el grado de dependencia lineal a través del coeficiente de determinación (R^2).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Efecto sobre los sólidos solubles

Estadísticamente el uso o no del coadyuvante forma un solo subconjunto, por lo que se puede inferir que el uso de la cal no modifica significativamente la inversión de la sacarosa (tabla 5).

Tabla 5. Resumen del análisis estadístico para determinar el efecto del uso de floculante y coadyuvante y de la presión de evaporación sobre el coeficiente glucósido de la miel

Variable de estudio	Influencia significancia	Subconjuntos homogéneos (dependencia)		
Presión	Influye sig. < 0,01	103 kPa	89 y 35 kPa	15 kPa
Floculante	Influye sig. < 0,01	Con floculante		Sin floculante
Coadyuvante	No influye	Con y sin coadyuvante		
Combinaciones	No influyen			

Se graficaron las curvas de coeficiente glucósido contra la concentración de los sólidos solubles presentes en la miel medidos en °Brix, para las cuatro presiones y las cuatro combinaciones de las modalidades de uso del floculante y el coadyuvante estudiadas (figura 2). En todos los tratamientos se aprecia un aumento del coeficiente glucósido al aumentar la presión y el logaritmo de la concentración de la miel, con un valor de R^2 entre 0,9767 y 0,9928. Tendencia que se mantiene al extrapolar las curvas hasta los valores de coeficiente glucósido del jugo clarificado sin floculante ni coadyuvante.

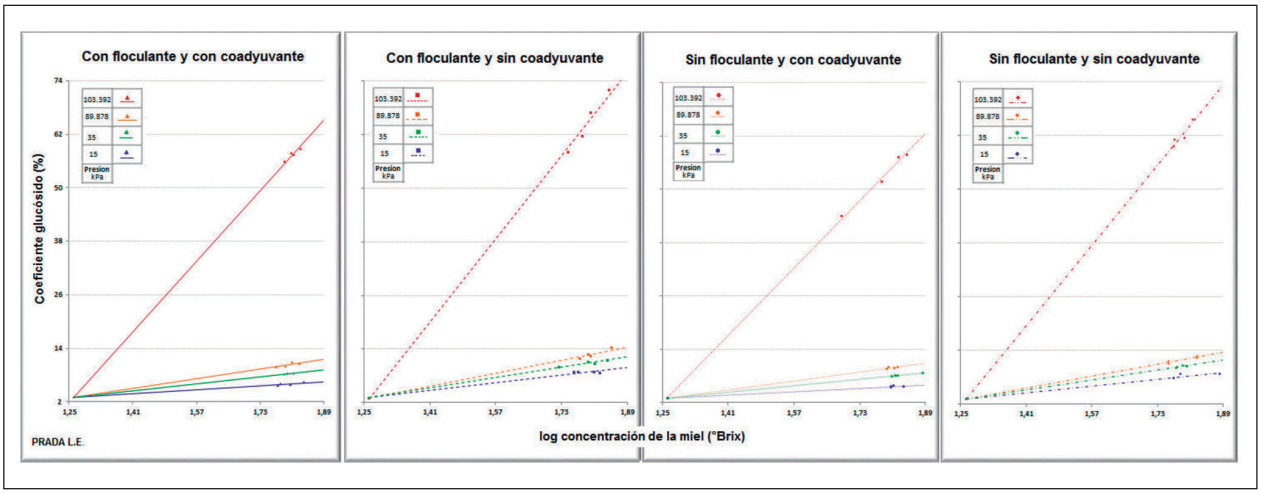

Figura 2. Efecto de la presión de evaporación y del uso de floculante y coadyuvante sobre el coeficiente glucósido de la miel

Al superponer las curvas de la figura 2, se aprecian con mayor claridad las diferencias que presentan los valores de coeficiente glucósido de las muestras del sistema presurizado respecto a las de presiones tanto atmosférica como al vacío de 35 kPa, así como las diferencias de estos últimos con los valores de los tratamientos al vacío de 15 kPa (figura 3). El alto contenido de azúcares invertidos que poseen las mieles producidas en sistemas de evaporación presurizados les aportan grandes diferencias en sus características fisicoquímicas, entre ellas que sus panelas no logran la solidificación, aun en los tratamientos en los que se adicionó coadyuvante. Las mieles de todos los tratamientos a presiones tanto atmosférica como al vacío solidificaron y presentaron una apropiada dureza, destacando que los tratamientos al vacío de 15 kPa presentaron los menores valores de coeficiente glucósido, la menor inversión y mayor dureza.

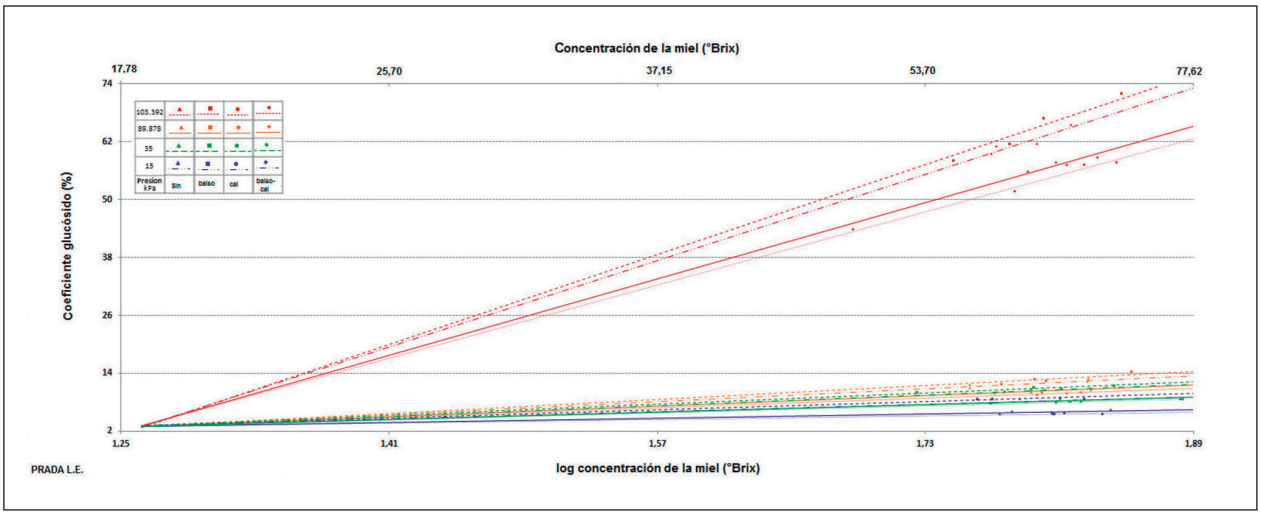

Figura 3. Superposición de las curvas del efecto de la presión de evaporación y del uso de floculante y coadyuvante sobre el coeficiente glucósido de la miel

p. 153-172

© 2014 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

En cada una de las presiones se diferencian dos subconjuntos. Así, las muestras a las que se les adicionó floculante presentaron un aumento significativo estadísticamente del coeficiente glucósido en comparación con aquellas a las que no se les adicionó. Esta diferencia es ocasionada no solo por la inversión de la sacarosa, sino por un posible aporte de azúcares reductores realizado por el floculante (Acero *et al*., 2001). Aunque no significativas estadísticamente, las muestras a las que se les adicionó coadyuvante presentaron menores valores de coeficiente glucósido respecto de aquellas a las que no se les adicionó. Esto se debe a que en el proceso panelero se trabaja con pH cercanos al punto isoeléctrico del jugo, lo que favorece una suave inversión de la sacarosa, pues se requieren pH superiores a 7 para minimizar la inversión.

Al graficar el coeficiente glucósido contra el logaritmo de la concentración de la miel (°Brix), para los cuatro valores de presión y las tres cantidades de antiespumante estudiadas (figura 4), aumenta el coeficiente glucósido al incrementarse el logaritmo de la concentración de la miel, la cantidad de antiespumante y la presión, con un R^2 entre 0,949 y 0,9970. Tendencia que se mantiene al ser extrapolada hasta los valores de coeficiente glucósido del jugo clarificado sin floculante ni coadyuvante. Este aumento en los tratamientos con antiespumante permite afirmar que el ácido palmítico se reduce catalizado por la temperatura y los iones de hierro presentes en el jugo.

De esta forma, al graficar el coeficiente glucósido de las mieles con una concentración de 70 °Brix, contra la cantidad de antiespumante utilizada para cada una de las cuatro presiones experimentales, también se observa la tendencia lineal del coeficiente glucósido a aumentar a medida que aumenta la presión y la cantidad de antiespumante, con un R^2 entre 0,9573 y 0,9779 (figura 5). Sin embargo, la pendiente de estas líneas es solo del orden de 10^{-4}, por lo que se puede afirmar que la cantidad de antiespumante utilizada durante la evaporación del jugo de caña no altera significativamente las reacciones de hidrólisis de la sacarosa ni las concentraciones de azúcares reductores y sacarosa de la miel, como sí lo hace la presión de evaporación.

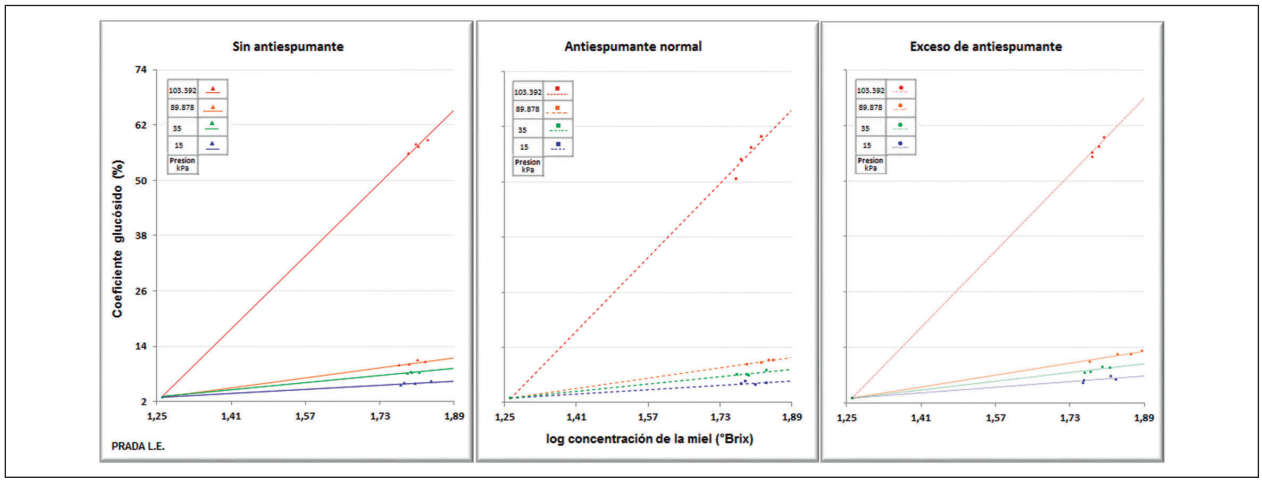

Figura 4. Efecto de la presión de evaporación y la concentración de antiespumante sobre el coeficiente glucósido a diferentes concentraciones de sólidos solubles de la miel

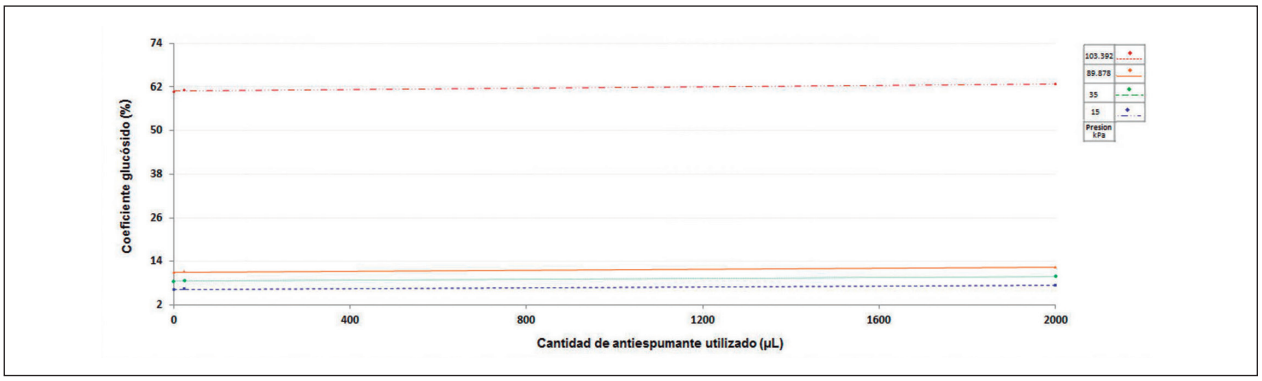

Figura 5. Efecto de la presión de evaporación y la cantidad de antiespumante sobre el coeficiente glucósido de la miel de caña de 70 °Brix

Lo expuesto se confirma con el análisis estadístico, en el cual los valores de coeficiente glucósido forman un subconjunto único para todas las cantidades de antiespumante estudiadas (tabla 6).

Efecto sobre el potencial de hidrógeno

Al graficar las curvas de potencial de hidrógeno contra el logaritmo de la concentración de la miel para las cuatro presiones y las cuatro combinaciones de las modalidades de uso del floculante y coadyuvante (figura 6), se aprecia que en todos los tratamientos el pH presenta una tendencia inversamente proporcional al logaritmo de la concentración de la miel y a la presión de evaporación, con un valor de R^2 entre 0,9578 y 0,9931; tendencia que se mantiene al extrapolar las curvas hasta los valores de pH del jugo clarificado en cada tratamiento.

En cada una de las cuatro presiones estudiadas, el pH de la miel disminuyó 0,4 y 0,5 unidades en relación con el del jugo; valor similar en los tratamientos con y sin coadyuvante, debido a que la modificación del pH fue cercana al punto isoeléctrico, y a estos valores las reacciones de inversión de la sacarosa y de PNE no se inhiben significativamente.

También se aprecia que en cada una de las presiones, el uso de la cal presenta dos subconjuntos con diferencias estadísticamente significativas y un incremento del pH del jugo y la miel, el cual favorece el aumento del coeficiente glucósido. Contrariamente, el uso del balso disminuye levemente el pH del jugo y la miel. La explicación a este comportamiento no se encuentra en el pH de disolución del floculante (6,0 a 6,36), el cual es ligeramente superior al del jugo clarificado sin balso-cal, sino en el aporte de azúcares reductores que realiza la disolución de floculante (Acero *et al.*, 2001). Esto debido a que durante el calentamiento las reacciones de hidrólisis y PNE se ven favorecidas y por consiguiente, como se explicó anteriormente, se autocatalizan. Este fenómeno también explica las diferencias en los valores de pH que presentan las mieles de los sistemas presurizados.

Tabla 6. Resumen del análisis estadístico para determinar el efecto de la concentración de antiespumante y la presión de evaporación sobre el coeficiente glucósido de la miel

Variable de estudio	Influencia significancia	Subconjuntos homogéneos (dependencia)		
Presión	Influye sig. < 0,01	103 kPa	89 y 35 kPa	15 kPa
Cantidad antiespumante	No influye		0, 25 y 4000 µL/L	
Presión - antiespumante	No influye			

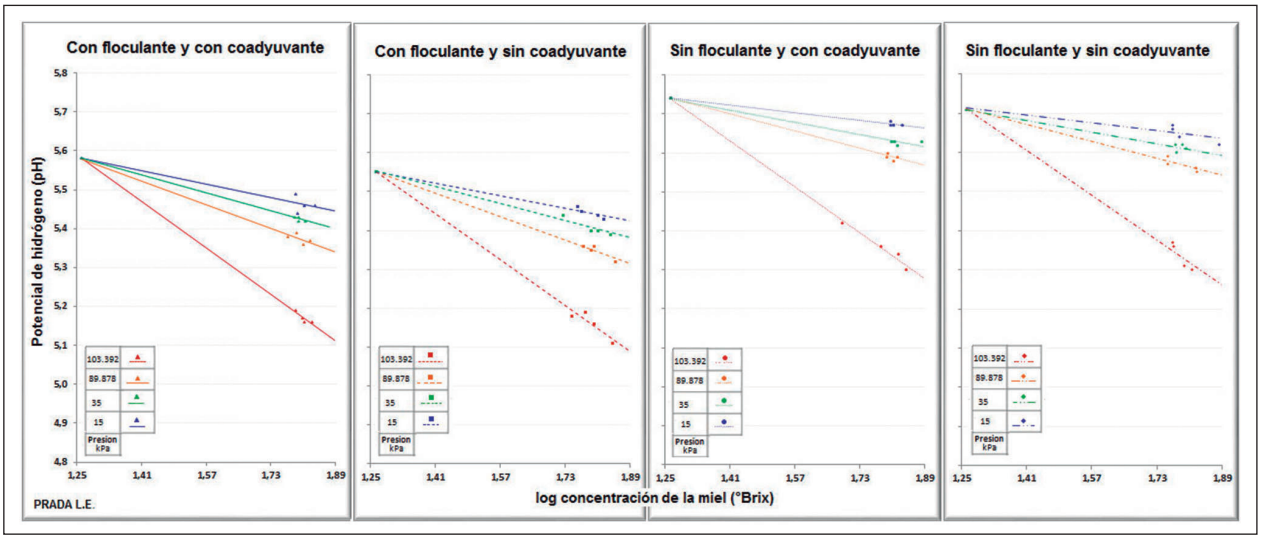

Figura 6. Efecto de la presión de evaporación y del uso de floculante y coadyuvante sobre el potencial de hidrógeno de la miel

© 2014 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

Así, los menores valores de pH se presentaron en los sistemas presurizados y clarificados con floculante y los mayores valores en los tratamientos con cal y al vacío de 15 kPa, comprobando de esta forma los resultados estadísticos (tabla 7).

Tabla 7. Resumen del análisis estadístico para determinar el efecto del uso de floculante y coadyuvante y de la presión de evaporación sobre el pH de la miel

Variable de estudio	Influencia significancia	Subconjuntos homogéneos (dependencia)			
Presión	Influye sig. < 0,01	15 kPa	35 kPa	89 kPa	103 kPa
Floculante	Influye sig. < 0,01	Con floculante		Sin floculante	
Coadyuvante	Influye sig. < 0,01	Con coadyuvante		Sin coadyuvante	
Combinaciones	No influyen				

Al variar la presión y aumentar excesivamente la cantidad de antiespumante, se aprecian diferencias significativas en los valores de pH (tabla 8).

Tabla 8. Resumen del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión de evaporación y la concentración de antiespumante sobre el pH de la miel

Variable de estudio	Influencia significancia	Subconjuntos homogéneos (dependencia)			
Presión	Influye sig. < 0,01	103 kPa	89 kPa	35 kPa	15 kPa
Cantidad antiespumante	Influye sig. < 0,01	0 y 50 µL/L		4000 µL/L	
Presión - antiespumante	Influye sig. < 0,01				

Para observar mejor el comportamiento del antiespumante, en la figura 7 se graficó el potencial de hidrógeno contra la cantidad de antiespumante utilizada, para una concentración de las mieles de 70 °Brix y cada una de las cuatro presiones experimentadas. En ella se aprecia que aunque los valores de pH para los tratamientos a presión atmosférica y al vacío son similares, existe una tendencia lineal a incrementar el valor del pH a medida que se utiliza mayor cantidad de antiespumante, en cada uno de los cuatro grupos de presión con valores de R^2 entre 0,9473 y 0,9999. Esta tendencia se mantiene al extrapolar las curvas hasta los valores de pH del jugo clarificado sin floculante ni coadyuvante. Este incremento es mayor a medida que se eleva la presión. De esta forma, cuando se adiciona antiespumante en exceso el incremento en el valor del pH en los tratamientos a presiones atmosféricas y al vacío es de aproximadamente 0,1 unidad y en los sistemas presurizados es de hasta 0,2 unidades.

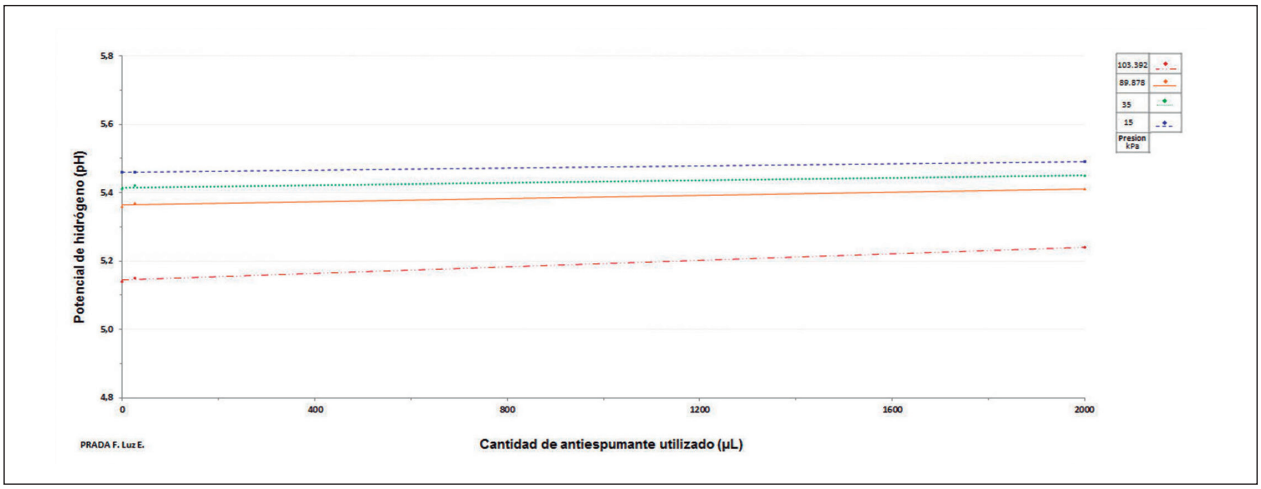

Figura 7. Efecto de la presión de evaporación y la concentración de antiespumante sobre el potencial de hidrógeno de la miel de caña de 70 °Brix

Varios fenómenos pueden explicar el comportamiento anterior:

- Las reacciones de hidrólisis y PNE: crean un sistema autocatalítico que disminuye el pH (Brumovky, 2012).
- Las reacciones de reducción del ácido palmítico: compiten por los grupos amino (FAO, 1997).
- El efecto piezoeléctrico: al aumentar la presión del sistema, el agua se polariza y se contrae el tamaño de la molécula, lo que lleva a aumentar la acidez y disminuir el pH (Díaz y Clotet, 1995).

Efecto sobre el color

La gráfica de las curvas de color expresado en unidades ICUMSA, contra el grado de evaporación medido como el logaritmo de la concentración de sólidos solubles (°Brix), muestra una tendencia del color a aumentar respecto al logaritmo de la concentración de la miel, con valores de R^2 entre 0,9624 y 0,9980 (figura 8). Esta tendencia se mantiene al extrapolar las curvas hasta los valores de color del jugo clarificado en cada uno de los tratamientos.

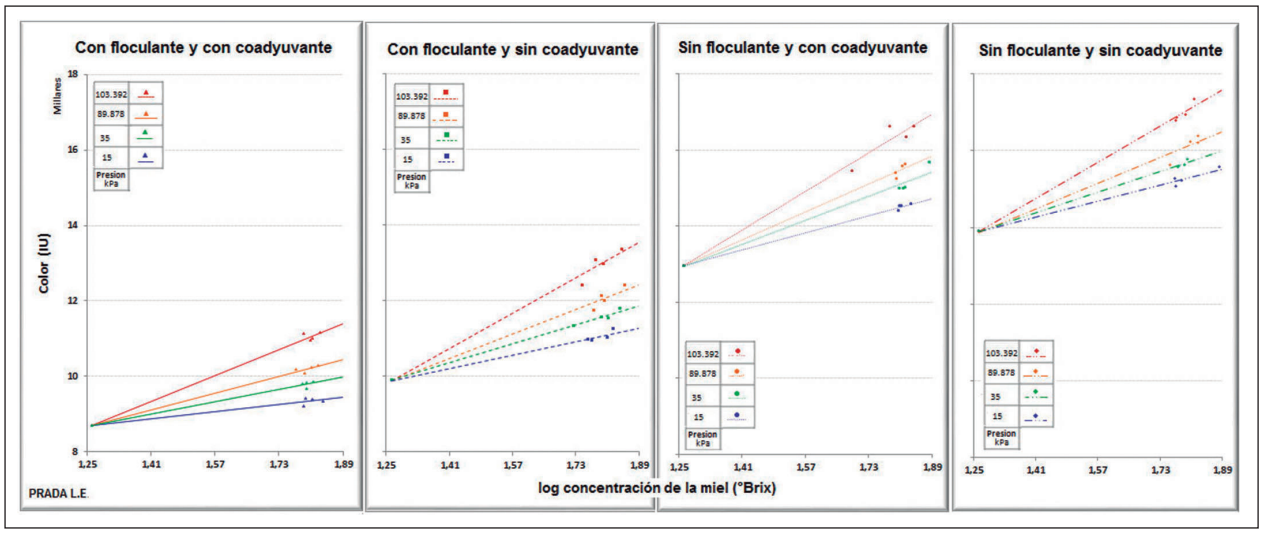

Figura 8. Efecto de la presión de evaporación y del uso de floculante y coadyuvante sobre el color de la miel

Es notorio que el cambio en el color se inicia desde el momento en que se agrega el floculante y el coadyuvante al jugo, ya que los cuatro tratamientos inician con un valor diferente del color del jugo y se mantiene como un grupo diferente en las mieles. Los valores de color se presentan de mayor a menor, es decir de más oscuro a más claro, en los tratamientos balso-cal, cal, balso y sin balso-cal. Además, en cada grupo se presentaron al igual que en los casos anteriores tres grupos definidos por el efecto de la presión, donde los tratamientos al vacío presentan menor color que los tratamientos presurizados (tabla 9).

Tabla 9. Resumen del análisis estadístico para determinar el efecto del uso de floculante y coadyuvante y de la presión de evaporación sobre el color de la miel

Variable de estudio	Influencia significancia	Subconjuntos homogéneos (dependencia)			
Presión	Influye sig. < 0,01	15 kPa	35 kPa	89 kPa	103 kPa
Floculante	Influye sig. < 0,01	Con floculante		Sin floculante	
Coadyuvante	Influye sig. < 0,01	Con coadyuvante		Sin coadyuvante	
Combinaciones	No influyen				

p. 153-172

© 2014 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

Adicionalmente, se observó la correlación entre el pH y el color reportada por la literatura (Rein, 2012), ya que las muestras de menor pH (mayor acidez) presentaron los colores más claros.

El oscurecimiento de los productos tratados con cal es el resultado de las reacciones entre los polifenoles presentes en el jugo con el fósforo y el oxígeno, las cuales incrementan la concentración del calcio en el jugo y favorecen la formación de sustancias oscuras al reaccionar con el nitrógeno, el fósforo y el hierro. Así, el fosfato de calcio que se forma durante la alcalinización absorbe color y la separación de las partículas no deseadas no elimina todo el color producido durante el proceso (Honig, 1982). El pH también afecta la estructura y estabilidad de las antocianinas: a pH entre 2 y 7 se da la pérdida del protón y la adición de agua en posición 2 generando formas incoloras, mientras que los valores de pH superiores a 7 favorecen las formas quinoidales de coloraciones púrpuras (Garzón *et al*., 2008).

Contrariamente a lo que podría esperarse, en los tratamientos a la misma presión el color de las mieles clarificadas con balso aumenta, debido al incremento de las sustancias coloreadas, producto de las reacciones de hidrólisis y PNE, favorecidas por el aporte de azúcares reductores del floculante y de los compuestos fenólicos y de hierro (Acero *et al*., 2001), los cuales forman durante el calentamiento complejos iónico-miscelares altamente coloreados.

El análisis del color con la tabla Munsell mostró que los tratamientos con adición de cal disminuyeron el brillo y la saturación; y los tratamientos con adición de balso presentaron un incremento en la HUE o tono.

Al graficar las curvas de color contra el grado de evaporación medido en °Brix, para los 12 tratamientos estudiados, presentan una tendencia a aumentar el color a medida que aumenta el logaritmo de la concentración del jugo para producir la miel (figura 9). Tendencia que se mantiene al extrapolar las curvas hasta los valores de pH del jugo clarificado sin floculante ni coadyuvante, con un R^2 entre 0,9473 y 0,9999. También se observa que el color se incrementa al aumentar la presión del sistema y la cantidad de antiespumante empleada, debido a que se favorecen las reacciones de hidrólisis y PNE.

En todos los tratamientos el color difiere significativamente, comprobando así los resultados del análisis estadístico (tabla 10).

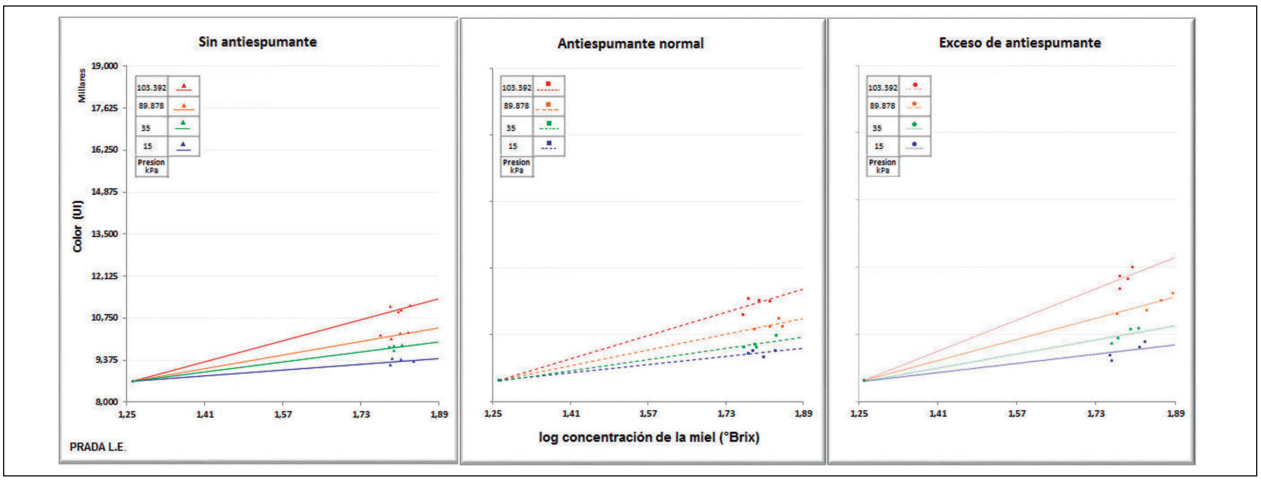

Figura 9. Efecto de la presión de evaporación y la concentración de antiespumante sobre el color de la miel

Tabla 10. Resumen del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión de evaporación y la concentración de antiespumante sobre el color de la miel

Variable de estudio	Influencia significancia	Subconjuntos homogéneos (dependencia)	
Presión	Influye sig. < 0,01	103 y 15 kPa	89 y 35 kPa
Cantidad antiespumante	Influye sig. < 0,01	0 µL/L y 50 µL/L	4000 µL/L
Presión - antiespumante	Influye sig. < 0,01		

El análisis subjetivo del color con la tabla Munsell mostró que las mieles de los tratamientos en los cuales se utilizó antiespumante presentan el mismo tono e intensidad pero disminuye el valor de la saturación del color. Así, la presión y el exceso de antiespumante oscurecen la miel y la panela, aportándoles características organolépticas no aceptables para su comercialización como son sensación y sabor grasosos en la boca. Características causadas posiblemente porque el antiespumante es un tensoactivo, insoluble en solventes polares o acuosos, menos denso que la miel, por lo que forma una fina capa de aceite sobre la superficie de la miel y la panela, que se percibe cuando se adiciona en exceso.

Efecto sobre la turbidez

La gráfica de las curvas de turbidez expresadas en unidades ICUMSA contra el logaritmo de la concentración de sólidos solubles de la miel para los 16 tratamientos muestra una relación directa de la turbidez y la concentración de la miel, con un valor del coeficiente de ajuste R^2 entre 0,9796 y 0,9014 (figura 10).

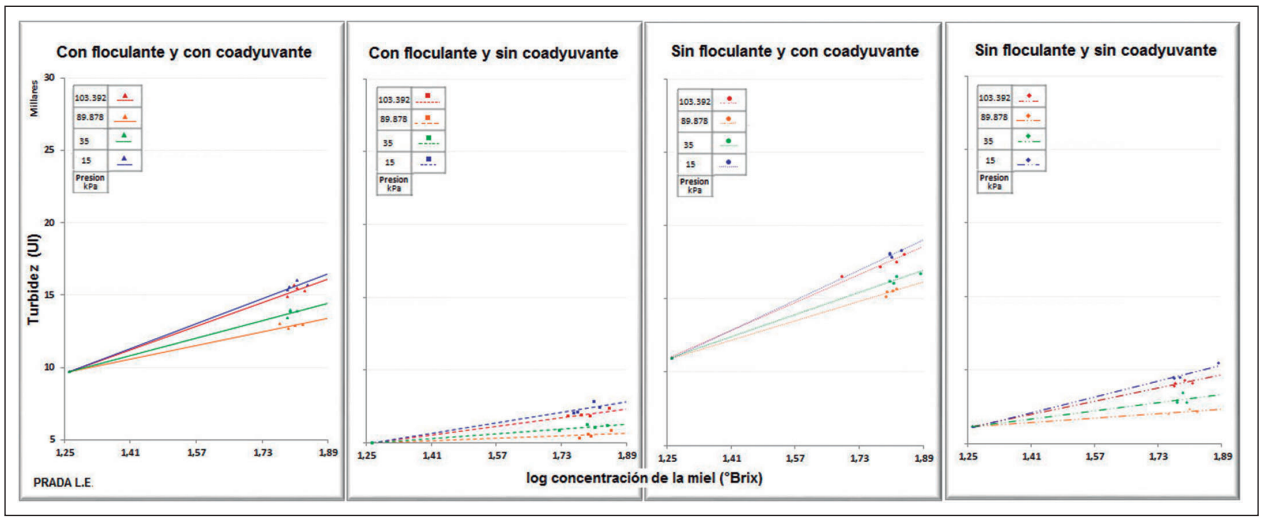

Figura 10. Efecto de la presión de evaporación y uso del floculante y coadyuvante sobre la turbidez de la miel

Se aprecia que la turbidez del jugo disminuye al utilizar el balso, caso contrario al uso del coadyuvante, formando así con cada tratamiento un grupo diferente. En cada grupo, la menor turbidez se logra a presiones cercanas a la atmosférica y la mayor en los sistemas presurizados y a presiones al vacío de 15 kPa. Estas tendencias se mantienen al extrapolar las curvas hasta los valores de turbidez del jugo clarificado para cada tratamiento. De esta forma, los menores valores de turbidez se encuentran en los tratamientos a presiones atmosféricas y al vacío de 35 kPa respectivamente. Los altos valores en los tratamientos al vacío de 15 kPa se deben al hecho de que la energía cinética no es la suficiente para lograr una adecuada coagulación de las partículas coloidales; mientras que en los sistemas presurizados la energía cinética es muy alta por lo que algunas de las miscelas formadas se redisuelven y otras se hinchan hasta reventar. Este comportamiento comprueba los resultados del análisis estadístico (tabla 11).

Tabla 11. Resumen del análisis estadístico para determinar el uso de floculante y coadyuvante y la presión de evaporación sobre la turbidez de la miel

Variable de estudio	Influencia significancia	Subconjuntos homogéneos (dependencia)			
Presión	Influye sig. < 0,01	15 kPa	35 kPa	89 kPa	103 kPa
Floculante	Influye sig. < 0,01	Con floculante		Sin floculante	
Coadyuvante	Influye sig. < 0,01	Con coadyuvante		Sin coadyuvante	
Combinaciones	No influyen				

© 2014 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

Al superponer las curvas de la figura 10 se aprecian dos grupos de curvas; el primero conformado por los tratamientos sin balso-cal y con cal y el otro por los tratamientos con balso-cal y con balso (figura 11). En este último grupo se empleó el floculante durante la clarificación y presenta los menores valores de turbidez ya que la disolución de balso flocula la mayoría de las partículas coloidales, facilitando su remoción por métodos físicos.

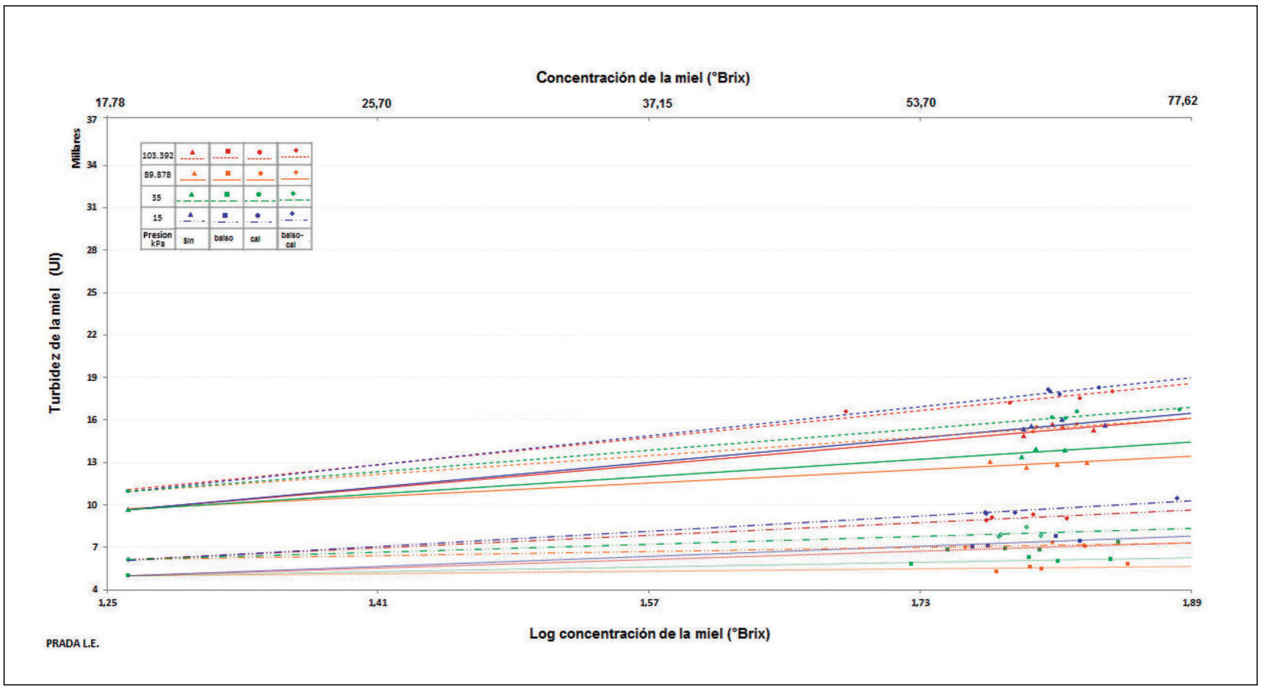

Figura 11. Curvas superpuestas del efecto de la presión de evaporación y del uso de floculante y coadyuvante sobre la turbidez de la miel

Adicionalmente se observa que el uso de coadyuvante incrementa el valor de la turbidez, debido a que al alcalinizar el jugo en caliente, el primer efecto del calor es la desnaturalización de las proteínas (Rein, 2012) y la coagulación de los coloides; sin embargo, como el pH utilizado es cercano al punto isoeléctrico (pH entre 5,5 y 6,0), la mayoría de las proteínas contenidas en el jugo no alcanzan una completa desnaturalización, por lo que durante la evaporación se continúa el proceso de coagulación. Estos coágulos no tienen la fuerza mecánica suficiente para soportar su remoción por métodos físicos y aunque después de la adición de cal se precipitan algunos fosfatos de calcio, no se absorben ni ocluyen todos los fragmentos, resultando una solución ligeramente más turbia que, además, incrementa el sarro del recipiente de evaporación.

Así, cuando se sedimentan las mieles de los diferentes tratamientos se observa que en aquellos donde no se adicionó balso y cal, la mayor parte de las partículas floculan y solo una pequeña cantidad de estos sedimentos presentan una coloración negruzca. En los tratamientos con balso se presenta solo una pequeña cantidad de precipitado color blanco y en los tratamientos con cal se presenta una gran cantidad de precipitado negruzco. Los tratamientos con balso y cal presentan un precipitado blancuzco y flotan sobre la superficie unas partículas negruzcas. Los tratamientos con balso presentaron mieles transparentes y brillantes, mientras las de los otros dos tratamientos fueron opacas y turbias.

La gráfica de la turbidez contra el logaritmo de la concentración de la miel, para las cuatro presiones y las tres concentraciones de antiespumante estudiadas, muestra una tendencia directa de la turbidez con el logaritmo de la concentración del jugo y la concentración del antiespumante con un valor de R^2 entre 0,8306 y 0,9867 (figura 12). Esta tendencia se mantiene al extrapolar las curvas hasta los valores de pH del jugo clarificado sin floculante ni coadyuvante; además, para el mismo valor de presión, el uso de mayor cantidad de antiespumante genera deterioro de la calidad de la panela debido a un incremento significativo en la turbidez.

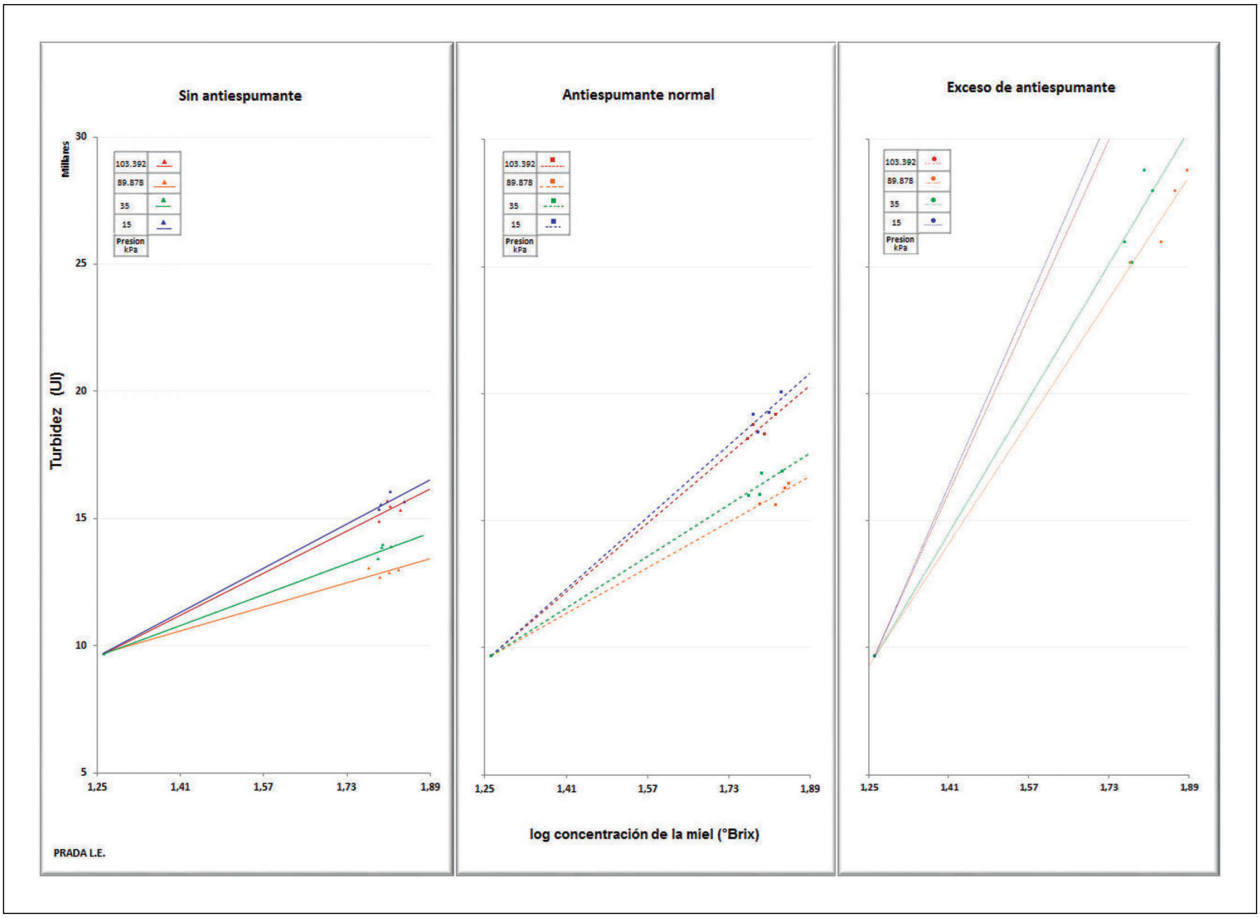

Figura 12. Efecto de la presión de evaporación y la concentración de antiespumante sobre la turbidez de la miel y la panela

También se observa que las curvas forman dos grupos en cada presión; el primero conformado por las curvas de las mieles obtenidas al vacío de 15 kPa y presurizado. El segundo, conformado por las mieles producidas a presión atmosférica y al vacío de 35 kPa, presenta los menores valores de turbidez. Este comportamiento coincide con los resultados del análisis estadístico (tabla 12).

Tabla 12. Resumen del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión de evaporación y la concentración de antiespumante sobre la turbidez de la miel

Variable de estudio	Influencia significancia	Subconjuntos homogéneos (dependencia)		
Presión	Influye sig. < 0,01	103 y 15 kPa	89 y 35 kPa	
Cantidad antiespumante	Influye sig. < 0,01	0	50 µL/L	4000 µL/L
Presión - antiespumante	Influye sig. < 0,01			

p. 153-172

© 2014 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

Para mejor visualización de este comportamiento se graficó la turbidez contra la presión para cada una de las cantidades de antiespumante experimentadas y a concentraciones de miel de 70 °Brix (figura 13).

Estas curvas con valores de R^2 entre 0,8712 y 0,8814 muestran los resultados anteriores y una posible tendencia polinómica de segundo grado, la cual requiere para su comprobación más experimentación en valores cercanos a la presión atmosférica; la turbidez de mieles y panelas presenta una relación directa con el brillo e inversa con el contenido de sólidos insolubles. Una explicación a este comportamiento es que la coagulación del material iónico y coloidal no removido durante la clarificación continúa durante la evaporación debido al movimiento de las partículas ocasionado por la temperatura; pero a altas temperaturas algunos de los complejos iónicos-miscelares formados absorben un exceso de agua y se revientan, por lo que se producen nuevas partículas coloidales y por consiguiente se aumenta la turbidez (Zamora *et al*., 2011) y se disminuye el brillo de la miel y la panela. El uso del antiespumante incrementa este efecto debido a que los complejos iónicos-miscelares formados tienen un grupo polar y otro apolar, por lo que otras sustancias apolares y polares quedan atrapadas entre la miel y el antiespumante.

Después del enfriamiento y sedimentación de las mieles, los tratamientos con antiespumante presentaron la mayor cantidad de precipitado oscuro y una nata aceitosa con sedimentos de color oscuro que sobrenada en la superficie de la miel, debido a que el antiespumante no es miscible en la miel y es menos denso que ella.

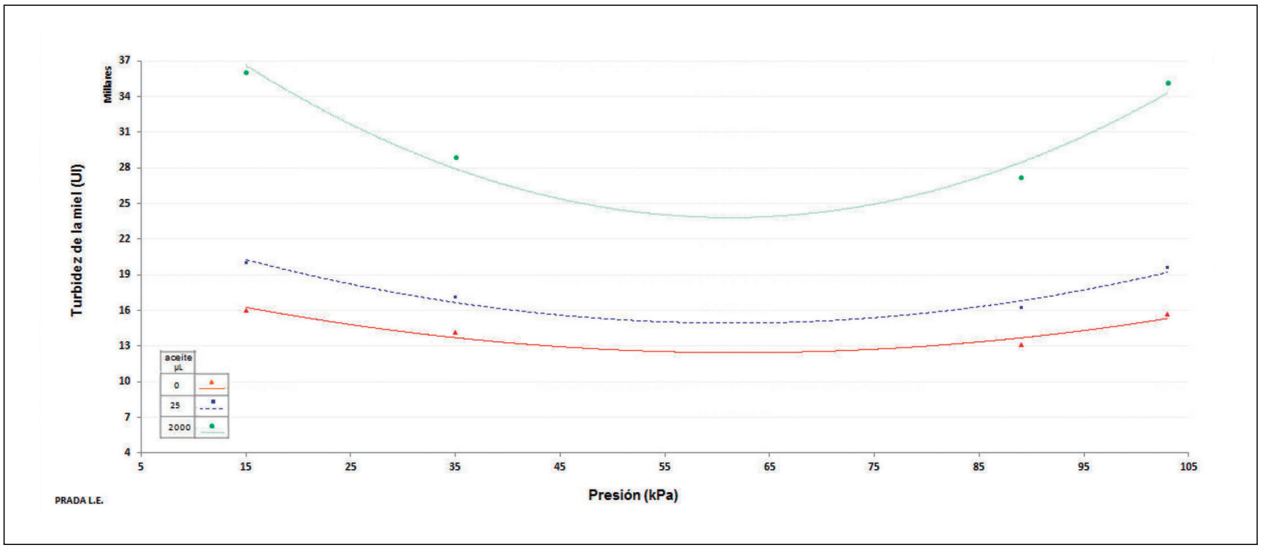

Figura 13. Efecto de la presión de evaporación y la concentración de antiespumante sobre la turbidez de la miel a 70 °Brix

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Todas las mieles obtenidas en los tratamientos del sistema presurizado presentaron coloraciones oscuras, tonalidades rojizas, alta turbidez, coeficientes glucósidos mayores de 62%, y no lograron la solidificación aun con el uso del coadyuvante.

Las altas temperaturas y presiones del sistema presurizado favorecen las reacciones de hidrólisis y PNE hasta el punto que las mieles y la panela producidas en estos sistemas no cumplen los requerimientos de la resolución 779 del Ministerio de la Protección Social en cuanto a sacarosa y azúcares reductores.

El uso del floculante natural durante la clarificación mejora la calidad de mieles y panelas aportándole mayor brillo, un suave incremento del tono rojizo del color en 18% y una significativa disminución de la turbidez en promedio de 55%, cualidades altamente apreciadas por el consumidor.

El uso del coadyuvante mejora la solidificación y dureza de la panela, pues disminuye en promedio 22,6% el coeficiente glucósido de las mieles; pero incrementa el color y la turbidez de las panelas y mieles en promedio 48% y 24% respectivamente; características que son poco atractivas al consumidor y que además incrementan la incrustación del equipo.

Usar floculante y coadyuvante también mejora el brillo, la solidificación y la dureza de la panela, y disminuye la turbidez aunque en menor grado que cuando se emplea solamente balso o cal. Se recomienda estudiar el efecto de su uso sobre la formación de sarro en el equipo, pues durante la experimentación se dificultó la limpieza de los recipientes.

Usar hasta 50 µL de antiespumante por 1 litro de jugo clarificado (cantidad normalmente empleada en el trapiche), en cualquier sistema de presión, no altera significativamente el color, el coeficiente glucósido y el pH de la miel, pero incrementa significativamente la turbidez, hasta duplicar su valor en relación con los casos en los que no se usa antiespumante.

Un exceso de antiespumante incrementa significativamente el color, sólidos insolubles y turbidez, lo que le confiere a la miel y a la panela un sabor desagradable y deja una capa grasosa sobre su superficie.

Se recomienda explorar en el prototipo del sistema EME del Cimpa y el uso de sistemas físicos (como el incremento del número de efectos) para disminuir la cantidad de espuma, ya que en el sistema simulado en el laboratorio para la evaporación del jugo de caña, la regulación de la presión con variaciones máximas de 10 kPa permite controlar la formación de espuma, sin el uso de antiespumante.

El uso del antiespumante disminuye el volumen de la espuma y utilizado en cantidades de hasta 50 µL por litro de jugo clarificado no modifica significativamente la calidad de la miel o la panela; sin embargo, debido a la dificultad observada en la limpieza de los equipos de evaporación, se recomienda estudiar el efecto de uso del antiespumante sobre la formación de sarro en el recipiente de evaporación.

AGRADECIMIENTOS

A Corpoica y la Universidad Industrial de Santander por el 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", del cual forma parte esta investigación. Al Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural por su financiación.

REFERENCIAS

Acero O, Pacheco G. 2001. Elaboración de las fichas técnicas de las disoluciones mucilaginosas de balso, cadillo y guásimo: aglutinantes en el proceso de clarificación del jugo de caña (tesis de grado), Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia, Tunja. 128 p.

Alva M. 2005. Estudio para minimizar la formación de espumas en mezclas de aminas utilizadas en el proceso de endulzamiento de gas natural (tesis de grado), Universidad de Las Américas Puebla. Cholula, México. 48 p.

Álvarez M. 2005. La fritura de los alimentos En: http://www.monografias.com/trabajos 31/fritura-alimentos/fritura-alimentos.shtml

Brumovsky L. 2012. Pardeamiento enzimático. En: Docencia Universidad Nacional, http://www.aulavirtual-exactas.dyndns.org/claroline/backends/download.php?url=L1BhcmRlYW1pZW50b0VuemltYXRpY28yMDEyQ29sb3IucGRm&cidReset=true&cidReq=RICIONUTRI. Consulta: noviembre 2012.

Díaz N, Clotet R. 1995. Cinética de la caramelización en soluciones azucaradas simples. En: Alimentaria: Revista de Tecnología e Higiene de los Alimentos 259(1):35-38.

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 (tesis de grado). Fundación Universidad de América. Bogotá, 81 p.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 1997. Grasas y aceites en la nutrición humana. En: http://www.fao.org/docrep/v4700s/v4700s00.htm. Consulta: marzo 2009.

García D. 2007. Estudio cinético de la inversión de la sacarosa. En: Docencia Universidad de Coruña, http://www.buenastareas.com/ensayos/Estudio-Cinetico-De-La-Inversion-De/5133110.html; consulta: abril 2009.

García H, Peña A, López R, Durán E, Olvera G. 2010. Desarrollo de un sistema de evaporación y concentración de jugos de múltiple efecto para mejorar la eficiencia térmica y productividad y disminuir el impacto ambiental en la producción de panela. En: Ministerio de agricultura y desarrollo rural de Colombia, http://biblioteca.agronet.gov.co:8080/jspui/bitstream/123456789/1876/1. Consultado: septiembre 2010.

Hernández R. 2003. Espuma no deseada en destilerías de alcohol. Métodos de control. En: http://www.bibliociencias.cu/gsdl/collect/libros/index/assoc/HASH86b9.dir/doc.pdf. Consulta: enero 2009.

Honig P. 1982. Principios de tecnología azucarera. Tomo III. 4ª impresión, México, Continental. 645 p.

Hugot E. 1963. Manual para ingenieros azucareros. 6ª impresión, México, Continental, 803 p.

Jayes W. 2004. Optimum distribution of heating surface in a multiple effect evaporator train. En: South African sugar technologists' association, http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.381.4865&rep=rep1&type=pdf. Consulta: enero 2010.

© 2014 Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

Prada L. 2002. Mejoramiento en la calidad de miel y panela. En:http://biblioteca.agronet.gov.co:8080/jspui/bitstream/123456789/2318/1/145.pdf. Consulta: junio 2010.

Prada L. 2006. La limpieza de los jugos: un requisito indispensable para la calidad de la panela y las mieles. Revista Innovación y Cambio Tecnológico 4(1):12-19.

Rein P. 2012. Ingeniería de la caña de azúcar. 2a. ed. Berlín, Bartens, 879 p.

República de Colombia. Ministerio de la Protección Social. 2006. Resolución 779 del 17 marzo del 2006. En: http://www.fedepanela.org.co/files/ Resolución_779_de_2006.Pdf. Consultado: abril 2010.

Rodríguez G, Gottret M. 2004. Aprendiendo del pasado para proyectarnos hacia el futuro: Adopción e impacto de la tecnología de panelea en la Hoya del Río Suárez y Cundinamarca (Colombia). En: http://ciat-library.ciat.cgiar.org:8080/jspui/bitstream/123456789/5307/1/adopcion_impacto_panela.pdf. Consulta: noviembre 2013.

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. Barbosa, Santander, Corpoica-Cimpa, 44 p.

Salager J, Andérez J, Forgiarini A. 2010. Espuma. En: http://espumasjpe.blogspot.com. Consulta: diciembre 2010.

Valenzuela A, Sanhueza J, Nieto S, Petersen G, Tavella M. 2003. Estudio comparativo, en fritura, de la estabilidad de diferentes aceites vegetales. Aceites y Grasas 13(4):568-573.

Zamora M, Molina M, Chacón G. 2011. Evaluación del 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.