

**DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA  
EVAPORACIÓN EN SISTEMAS MÚLTIPLE EFECTO, APROPIADAS PARA  
PRODUCIR PANELA DE CALIDAD SIMILAR A LA OBTENIDA POR  
EVAPORACIÓN ABIERTA.**

**LUZ ESPERANZA PRADA FORERO**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2014**

**DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE  
EVAPORACIÓN EN MÚLTIPLE EFECTO, APROPIADAS PARA PRODUCIR  
PANELA DE CALIDAD SIMILAR A LA OBTENIDA POR EVAPORACIÓN  
ABIERTA**

**LUZ ESPERANZA PRADA FORERO**

**Trabajo de investigación requisito para optar al título de magíster en  
ingeniería química**

**Directores:**

**Dr. ARLEX CHAVES GUERRERO**

**Docente UIS**

**IA MSc. HUGO REINEL GARCIA BERNAL**

**Investigador Corpoica**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA  
2014**

A mi familia por su apoyo y comprensión

## **AGRADECIMIENTOS**

La autora expresa su agradecimiento a Corpoica y a la UIS, por el desarrollo del presente trabajo, 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.

## CONTENIDO

	Pág.
Introducción .....	19
1 Revisión del estado del arte y marco teórico .....	21
2 Diseño metodológico.....	31
2.1 Hipótesis.....	31
2.2 Criterio de validez y confiabilidad de la investigación. ....	32
2.3 Variables e indicadores .....	33
2.4 Diseño experimental .....	36
2.5 Procedimiento experimental .....	37
2.5.1 Diseño del sistema de experimentación a escala de laboratorio para la evaporación de jugo de caña a diferentes presiones. ....	39
2.5.2 Metodología para la obtención, conservación y transporte de las muestras.....	44
2.6 Análisis estadístico .....	44
3 Efecto de la presión de evaporación y la densidad de flujo calórico sobre la calidad de la miel y la panela .....	46
3.1 Efecto de la presión de evaporación y la densidad de flujo calórico sobre los sólidos solubles.....	46
3.2 Efecto de la presión de evaporación y la densidad de flujo calórico sobre el potencial de hidrógeno .....	50

3.3	Efecto de la presión de evaporación y la densidad de flujo calórico Sobre el Color y el sabor .....	53
3.4	Efecto de la presión y la densidad de flujo calórico Sobre la turbidez ...	56
4	Efecto de la presión de evaporación y la cantidad de antiespumante, sobre la calidad de la miel y la panela.....	60
4.1	Efecto de la presión de evaporación y la cantidad de antiespumante sobre los sólidos solubles .....	60
4.2	Efecto de la presión y la cantidad de antiespumante sobre el potencial de Hidrógeno. ....	62
4.3	Efecto de la presión de evaporación y la cantidad de antiespumante sobre el Color y sabor .....	63
4.4	Efecto de la presión de evaporación y el antiespumante sobre la turbidez, los sólidos insolubles y el brillo. ....	65
5	Efecto de la presión de evaporación y uso del floculante y el coadyuvante de la clarificación sobre la calidad de la panela .....	69
5.1	Efecto de la presión de evaporación y uso del floculante y del coadyuvante sobre los sólidos solubles.....	69
5.2	Efecto de la presión de evaporación y uso del floculante y del coadyuvante de la clarificación sobre el pH.....	72
5.3	Efecto de la presión y el uso del floculante y del coadyuvante sobre el color... ..	74
5.4	Efecto de la presión de evaporación y uso del floculante y coadyuvante sobre la turbidez de la miel y panela .....	76
6	Efecto de la presión de evaporación y la variedad de caña sobre la calidad de la miel y la panela .....	80

6.1	Efecto de la presión evaporación y la variedad de caña sobre los sólidos solubles y el sabor. ....	80
6.2	Efecto de la presión de evaporación y la variedad de caña sobre el pH.....	82
6.3	Efecto de la presión de evaporación y la variedad de caña sobre el color... ..	85
6.4	Efecto de la presión de evaporación y la variedad de caña Sobre la turbidez, sólidos insolubles y brillo .....	87
	Conclusiones .....	90
	Recomendaciones. ....	93
	Referencias bibliograficas .....	95
	Bibliografía.....	101
	Anexos .....	107

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Diagrama de flujo de la primera etapa experimental .....	37
Figura 2. Diagrama de flujo de la segunda etapa experimental .....	38
Figura 3. Sistema experimental para la evaporación del jugo de caña a diferentes presiones en el laboratorio.....	41
Figura 4. Velocidad de calentamiento hasta alcanzar la ebullición del jugo de caña, para diferentes niveles de calor de la placa. ....	43
Figura 5. Efecto de la Presión evaporación y la densidad de flujo calórico sobre la pureza Pol y el glucobrix de la miel y la panela .....	47
Figura 6. Efecto de la presión y la densidad de flujo calórico del sistema sobre el coeficiente glucósido de la miel de caña a diferentes concentraciones. ....	48
Figura 7. Efecto de la presión de evaporación y la densidad de flujo calórico del sistema sobre el coeficiente glucósido de la miel de caña de 70°Brix .....	49
Figura 8. Efecto de la presión de evaporación y la densidad de flujo calórico sobre el pH de la miel de caña. ....	50
Figura 9. Efecto de la presión de evaporación y la densidad de flujo calórico sobre el pH de la miel de caña de 70°Brix.....	52
Figura 10. Efecto de la presión evaporación y la densidad de flujo calórico sobre el color de la miel de caña.....	53
Figura 11. Efecto de la presión de evaporación y la densidad de flujo calórico sobre el color de la miel de miel a 70°Brix.....	55

Figura 12. Efecto de la presión y la densidad de flujo calórico sobre la turbidez de la miel de caña.....	57
Figura 13. Efecto de la presión de evaporación y la densidad de flujo calórico sobre la turbidez de la miel de caña de 70°Brix.....	58
Figura 14. Efecto de la presión de evaporación y la cantidad de antiespumante sobre el coeficiente de glucósido de la miel de caña de 70°Brix.....	61
Figura 15. Efecto de la presión y cantidad de antiespumante sobre el potencial de hidrógeno de la miel de 70 °Brix.....	63
Figura 16. Efecto de la presión de evaporación y cantidad de antiespumante sobre el color de la miel.....	64
Figura 17. Efecto de la presión evaporación y la cantidad de antiespumante, sobre la turbidez de la miel y panela.....	65
Figura 18. Efecto de la presión evaporación y la cantidad de antiespumante, sobre la turbidez de la miel y panela.....	67
Figura 19. Efecto de la presión de evaporación y uso del floculante y coadyuvante, sobre el índice de glucósido de la miel y la panela.....	70
Figura 20. Efecto de la presión de evaporación y uso del floculante y coadyuvante, sobre el índice de glucósido de la miel y la panela.....	71
Figura 21. Efecto de la presión de evaporación y uso del floculante y coadyuvante, sobre el pH de la miel y la panela.....	72
Figura 22. Efecto de la presión y uso del coadyuvante y floculante, sobre el color de la miel y la panela.....	74
Figura 23. Efecto de la presión de evaporación y uso del coadyuvante y floculante, sobre la turbidez de la miel y la panela.....	76

Figura 24. Efecto de la presión de evaporación y uso del coadyuvante y floculante, sobre la turbidez de la miel curvas superpuestas .....	78
Figura 25. Efecto de la Presión de evaporación y la variedad de caña sobre el coeficiente glucósido de la miel.....	81
Figura 26. Efecto de la presión y la variedad de caña sobre el pH de la miel..	83
Figura 27. Efecto de la presión evaporación y la variedad de caña sobre el color de la miel. ....	85
Figura 28. Efecto de la presión y la variedad de caña sobre la turbidez de la miel.....	87

## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Rendimiento de las variedades de caña estudiadas y características fisicoquímicas del jugo, reportados en literatura. ....	29
Tabla 2. Control de las variables de ruido en la selección y preparación de la muestra. ....	33
Tabla 3. Valores experimentales de la presión del sistema de evaporación ...	33
Tabla 4. Edad de corte las variedades experimentales y propiedades fisicoquímicas básicas de sus jugos clarificados con calor. ....	34
Tabla 5. Métodos de análisis de las variables de respuesta .....	35
Tabla 6. Diseño experimental.....	36
Tabla 7. Resumen del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión y la densidad de flujo calórico sobre el coeficiente glucósido de la miel .....	49
Tabla 8. Resultados del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión y la densidad de flujo calórico sobre potencial de hidrógeno de la miel .....	51
Tabla 9. Resultados del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión de evaporación y la densidad de flujo calórico sobre el color de la miel .....	54
Tabla 10. Resumen del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión de evaporación y la densidad de flujo calórico sobre la turbidez de la miel.....	57

Tabla 11. Resultados del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión y cantidad de antiespumante sobre el coeficiente glucósido de la miel .....	60
Tabla 12. Resultados del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión y cantidad de antiespumante sobre el pH de la miel .....	62
Tabla 13. Resumen del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión de evaporación y cantidad de antiespumante sobre el color de la miel .....	64
Tabla 14. Resultados del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión y cantidad de antiespumante sobre la turbidez de la miel .....	66
Tabla 15. Resumen del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión de evaporación y uso del floculante y coadyuvante sobre el coeficiente glucósido de la miel .....	69
Tabla 16. Resumen del análisis estadístico del efecto de la presión de evaporación y el uso del floculante y coadyuvante sobre el potencial de hidrógeno de la miel.....	73
Tabla 17. Resumen del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión y uso del floculante y coadyuvante sobre el color de la miel .....	75
Tabla 18. Resultados del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión y uso del floculante y coadyuvante sobre el potencial de hidrógeno de la miel.....	77
Tabla 19. Resumen del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión de evaporación y la variedad de caña sobre coeficiente glucósido de la miel.....	81

Tabla 20. Resumen del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión de evaporación y la variedad de caña sobre potencial de hidrógeno de la miel..... 83

Tabla 21. Resumen del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión de evaporación y la variedad de caña sobre color de la miel ..... 86

Tabla 22. Resultados del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión de evaporación y la variedad de caña sobre color de la miel ..... 88

## LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Análisis comparativo del azúcar refinado, moscabado y panela....	107
Anexo B. Composición del jugo de caña de azúcar.....	108
Anexo C. Requisitos fisicoquímicos de la panela exigidos por el ministerio de protección social de Colombia.....	109
Anexo D. Equipos e instrumentos utilizados en el desarrollo del trabajo.....	110
Anexo E. Resultados de los análisis fisicoquímicos.....	111
Anexo F. Cálculo de la densidad de flujo calórico utilizado en la experimentación.....	115
Anexo G. Ficha técnica del balso.....	116
Anexo H. Diagrama de flujo y ecuación del balance de masa del proceso de evaporación.....	119
Anexo I. Resultados del análisis estadístico.....	120

## RESUMEN

**TITULO:** DETERMINACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LA EVAPORACIÓN EN SISTEMAS MÚLTIPLE EFECTO, APROPIADAS PARA PRODUCIR PANELA DE CALIDAD SIMILAR A LA OBTENIDA POR EVAPORACIÓN ABIERTA.\*

**AUTOR:** LUZ ESPERANZA PRADA FORERO\*\*

**PALABRAS CLAVES:** EVAPORADOR MÚLTIPLE EFECTO, CALIDAD DE PANELA, EVAPORACIÓN, PANELA, ANTIESPUMANTE, CLARIFICACIÓN, FLOCULANTE, AZÚCAR SIN CENTRIFUGAR.

**DESCRIPCIÓN:** Se estima que en la industria de la panela los evaporadores múltiple efecto (EME), permiten mayor control y ahorran hasta el 33% de la energía requerida; sin embargo su implementación, requiere además, que el producto mantenga la calidad obtenida en sistemas de evaporación abierta. Pero a pesar de la trayectoria de la tecnología EME, el efecto de factores tales como la temperatura del sistema, la velocidad de calentamiento, las diferencias varietales de la caña y el uso del balso, cal, y aceite de palma, sobre las complejas reacciones que ocurren durante la evaporación del agua y la concentración de los azúcares son desconocidos en el proceso de elaboración de panela. Con el fin de llenar parte de este vacío tecnológico, el trabajo que aquí se presenta tuvo como objetivo, determinar el efecto de la presión de evaporación y los parámetros: variedad de caña, densidad de flujo calórico y uso de floculante, coadyuvante y cantidad de antiespumante, sobre la calidad de la panela. Para lograrlo, se controló los efectos de ruido (condiciones agroclimáticas, acopio, extracción, prelimpieza y preparación de la muestra), se trabajó cuatro diseños experimentales completamente al azar con arreglos factoriales and se desarrolló una metodología de almacenamiento y transporte del jugo clarificado con calor bajo criterios de la NTC-ISO-IEC 17025, y un sistema para simular en laboratorio la evaporación del jugo a diferentes presiones. Los resultados mostraron que en las mieles y panelas: la floculación con balso mejora todos los parámetros de calidad; el uso de cal y aceite de palma aumenta la turbidez, el color y los insolubles, la variedad de caña le confiere diferencias en la turbidez y el uso de sistemas presurizados con bajo flujo calórico afecta negativamente el color, el pH, el coeficiente glucósido y la solidificación.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad De Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química. Directores: Dr. Arlex Chaves Guerrero, Dr. en ingeniería química y Hugo Reinol García Bernal, IA MSc.

## ABSTRACT

**TITLE:** DETERMINATION OF THE CONDITIONS OF OPERATION OF THE EVAPORATION IN SYSTEMS MULTIPLE EFFECT, ADAPTED TO PRODUCE PANELA (UNCENTRIFUGED SUGAR) OF QUALITY SIMILAR TO THE OBTAINED ONE FOR OPENED EVAPORATION.\*

**AUTHOR:** LUZ ESPERANZA PRADA FORERO\*\*

**PALABRAS CLAVES:** MULTIPLE-EFFECT EVAPORATOR, UNCENTRIFUGED SUGAR QUALITY, JUDGER CANE, EVAPORATION, PANELA, CLARIFICATION, DEFOAMER, FLOCCULATE.

**DESCRIPCIÓN:** It is estimated that in industry of panela (uncentrifuged sugar), the multiple-effect evaporators (EME), allow more control and save up to 33% of the energy required, but its implementation also requires the product maintain the quality obtained in open evaporation systems. But trajectory despite of EME-technology the effect of factors such as system temperature, heating rate, varietal differences cane and use of balso, lime, and palm oil, on the complex reactions occurring during the water evaporation and the concentration of the sugars are unknown in the production of panela. In order to fill the technological gap, the work presented here was aimed to determine the effect of evaporation pressure and the parameters: variety of cane, heat flow supplied and use of flocculent, coadjuvant y concentration of palm oil on the quality of the honey and the panela. To achieve it, was controlled noise effects (growing conditions, storage, extraction, pre-cleaning and preparation of the sample), To achieve it, was controlled noise effects (growing conditions, storage, extraction, pre-cleaning and preparation of the sample), it worked four experimental designs completely at random with arrangements factorials and it developed a system to simulate the evaporation of the juice at different pressures under the criteria of NTC-ISO-IEC 17025 and a method of storing and transporting clarified juice. The results showed that in honeys and panelas: the flocculation using balso improves all quality parameters, the use of lime and palm oil increases turbidity, color and insoluble, the cane variety confer differences in turbidity and use the pressurized systems with low caloric flux affects negatively color, pH, glycoside coefficient and solidification.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Facultad De Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química. Directores: Dr. Arlex Chaves Guerrero, Dr. en ingeniería química y Hugo Reinel García Bernal, IA MSc.

## INTRODUCCIÓN

Aun cuando la industria panelera colombiana en los últimos treinta años ha desarrollado una tecnología, que la ha convertido en una de las pioneras a nivel mundial y le permitió una reducción en sus costos de aproximadamente 37%, entre 1984 y 1998 [1], la evaporación aún se lleva a cabo en sistemas abiertos, que representan un significativo gasto energético de 9.200 kJ/kg de panela, que corresponde aproximadamente al 80% del consumo total de energía en la hornilla [2]. Esta situación se puede mejorar significativamente, empleando tecnologías como la evaporación de múltiple efecto, con la cual se ha demostrado que se puede lograr ahorros de hasta un 45% en el gasto energético global del proceso [3], además de un mejor control del mismo.

El evaporador múltiple efecto (EME), ha sido utilizado en la industria alimenticia, y específicamente en la azucarera desde mediados del siglo XX. [4]. El EME es un sistema de evaporación de varios pasos o efectos, donde el vapor producido en el primer efecto, se utiliza para evaporar el jugo en el segundo efecto y así sucesivamente [5]. A partir del segundo efecto, se trabaja a una presión inferior a la del efecto inmediatamente anterior, para garantizar que el vapor de calentamiento, se encuentre sobrecalentado y de esta forma alcanzar las temperaturas de ebullición, motivo por el cual, sólo se requiere suministrar energía de una fuente externa al primer efecto [6].

No obstante, para hacer posible su implementación además del ahorro energético y económico, se debe lograr que la panela producida, mantenga las características composicionales y organolépticas de la obtenida en sistemas de evaporación abierta. Esta condición, develo el desconocimiento de algunos fenómenos físicos y químicos que se dan en el jugo durante el proceso de evaporación, debido en parte a que se ha asumido que el proceso de concentración del jugo de caña, se limita a un problema de transmisión de calor [7].

La importancia de este conocimiento se hace evidente, si se tiene en cuenta que la panela es un producto de composición compleja, proveniente de la evaporación del jugo de caña de azúcar (*Saccharum Officinarum* L.), que contiene micro-cristales subhedrales o anhedrales amorfos no visibles al ojo humano, que mantiene sus elementos constitutivos como sacarosa, glucosa, fructosa y minerales (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** [8]) y no proviene de la reconstitución de sus elementos (CODEX, 2012) [9].

Por tal razón, el objetivo de este trabajo es determinar a partir de trabajo experimental, el efecto de la presión evaporación y las variables: variedad de la caña, densidad de flujo calórico y el uso del floculante, coadyuvante y antiespumante, sobre las características de calidad de la panela que son determinantes de la aceptación del producto por parte del consumidor. Por tal razón este documento se ha estructurado de la siguiente manera:

En el capítulo 1, se da una descripción del proceso de producción de panela y de la influencia de cada una de las etapas de producción sobre características como contenidos sacarosa, azúcares reductores y sólidos solubles e insolubles, potencial de hidrógeno, color, turbidez, brillo, solidificación y dureza. En el capítulo 2, se especifican las variables y valores a estudiar, se describe la metodología experimental, y el diseño del sistema a escala de laboratorio para la evaporación del jugo de caña a diferentes presiones y la metodología para la obtención conservación y transporte de las muestras y finalmente en cada uno los capítulos del 3 al 6, se presentan los resultados y su respectivo análisis para cada uno de los cuatro diseños experimentales empleados para determinar el efecto que tienen sobre la calidad de la panela, la presión y las variables: densidad de flujo calórico, cantidad de aceite de palma utilizado como antiespumante, uso del balso como floculante y la cal como coadyuvante y la variedad.

## 1 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO

La producción de panela, se inicia decantando el jugo extraído con el fin de eliminar las impurezas. Una vez libre de tierra y bagacillo, se lleva a la hornilla y se le adiciona un floculante. Al calentarse el jugo, se coagulan algunas de las partículas coloidales dispersas en él, estos coágulos no deseados en la panela, forman con el floculante, una nata llamada “cachaza”, la cual se remueve por métodos físicos. El jugo clarificado, se continúa calentando, hasta evaporar cerca del 80% del agua para convertirlo en miel. Cuando la miel 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; mientras que si se desea obtener panela en molde, entonces sólo se realiza un leve batido, seguido del moldeo y enfriamiento, de la miel, hasta su solidificación [10].

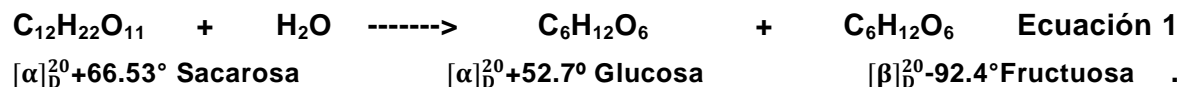
Adicionalmente, el jugo de caña crudo es un dispersoide líquido, compuesto de agua y sustancias solubles, iónicas, coloidales y gruesas, las cuales presentan una gran variación en su composición porcentual, dependiendo de las condiciones agroclimáticas del cultivo y la variedad (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) [11]. Por lo que la energía suministrada al proceso durante la evaporación no sólo elimina el agua, sino que da paso a un número sustancial de fenómenos de naturaleza química y fisicoquímica que modifican las características del producto final [7].

De esta forma el desconocimiento de aspectos tales como el efecto de la temperatura del sistema, la velocidad de calentamiento, las diferencias varietales de la caña y el uso del balso, cal, y aceite de palma, cobran gran importancia; máxime cuando en el proceso tradicional estas afectan significativamente la calidad de la panela. Para una mejor comprensión de la complejidad de esta problemática, en los capítulos siguientes se profundizará en cada uno de estos aspectos.

Como se mencionó anteriormente, en el jugo de la caña se encuentran dispersos además de la sacarosa y los azúcares reductores, múltiples sustancias donde la mayoría de estas son insaturadas y muy reactivas, razón por la cual durante la evaporación se siguen diversas rutas químicas, las cuales dependen no sólo de las características propias del jugo, sino de las condiciones de operación [12].

Entre la serie de importantes reacciones químicas que ocurren durante la evaporación, sobresalen las de hidrólisis y pardeamiento no enzimático (PNE), específicamente las reacciones Maillard y las de caramelización de algunos azúcares [13].

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, color y turbidez. Las soluciones de sacarosa se hidrolizan en cantidades iguales de los dos monosacáridos ( $\alpha$ -glucosa y  $\beta$ -fructosa), según la reacción [14]:



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 [15]. Su energía de activación a 20 °C es aproximadamente de 108,2 kJ y disminuye levemente cuando aumenta la temperatura [7]. La velocidad de inversión de la sacarosa, aumenta con la temperatura [16] y el tiempo de residencia [17]; 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 [18] y se han observado efectos inhibidores de algunos iones metálicos [7].

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 [19]. 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 sabor característico y coloración pardas rojizas o cafés oscuras [20].

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 auto-catalíticas. Estas reacciones se pueden dividir en tres etapas: 1) una condensación amino azúcar y posterior arreglo de Armadori, que son productos que apenas tienen color; 2) fragmentación y deshidratación de los azúcares formando las pre-melanoidinas y arreglo de Stercker y 3) polimerización del amino-aldehído en melanoidinas que son pigmentos amarillos, pardos, cafés y negros que presentan una gran variación de aromas [19].

Aunque 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 pueden presentarse y modificar las características de la panela [7].

Por otra parte la limpieza de los jugos durante la producción de panela en sistemas atmosféricos, es determinante de la calidad de la miel y la panela,

debido a que el jugo de la caña sale del molino con algunas sustancias solubles, iónicas, coloidales, lodos y bagacillos, no deseadas en el producto final; pues afectan la calidad de la miel y panela, en aspectos como la turbidez y el color [21]. Las sustancias más grandes como los lodos y bagacillos son eliminados por decantación antes que los jugos lleguen a la hornilla. Algunas sustancias solubles, iónicas y coloidales, como almidón, ceras y grasas son eliminadas en la hornilla durante la clarificación del jugo, la cual busca producir un jugo claro con el mínimo de turbidez.

Debido al tamaño de las partículas y a los movimientos Brownianos que las gobiernan, la remoción de estas sustancias por procedimientos físicos se dificulta, por lo que antes el material coloidal se debe coagular y flocular. Durante la coagulación las sustancias coloidales se agregan o solidifican en pequeños flocs o coágulos ya que sufren un cambio físico por la acción de un agente físico o químico. Entre los agentes coagulantes físicos, el calor es el más importante, aunque este no realiza coagulaciones completas. Entre los coagulantes químicos se encuentran las sales minerales o metálicas, los ácidos, los alcoholes y los electrólitos. De estas sustancias la más utilizada en la industria panelera, por sus resultados y la facilidad para su adquisición y manipulación es la cal [22]. Durante la floculación la utilización el uso de un floculante aumenta notablemente la velocidad de la clarificación del jugo, debido a que las partículas coaguladas forman masas o flóculos de mayor tamaño y peso molecular [23], permitiendo su remoción por métodos físicos.

La industria panelera Corpoica-Cimpa recomienda utilizar durante la clarificación del jugo altas velocidades de calentamiento (mayores a 1,5°C/min), un pH cercano al punto isoeléctrico (alrededor de 5,7) y una disolución del floculante natural como, el balso (*Helicarpus popayanensis* HBK), el cadillo (*Triumfetta affinis mollissima* HBK) y el guásimo (*Guázuma Ulmifolia* L). Para el ajuste del pH se recomienda utilizar una lechada de cal (0,150 kg de cal en un litro de agua), la cual se debe filtrar y agitar bien antes de su uso [21]. Estas condiciones que permiten el incremento de la velocidad y rendimiento de la reacción, la

destrucción enzimática y microbiológica de algunas sustancias y la coagulación y floculación de ciertas macromoléculas orgánicas. Por lo que una de las principales diferencias entre las industrias panelera y azucarera, es el pH del jugo y el tipo de floculante utilizado durante la clarificación del jugo; pues en el proceso azucarero se trabaja con pH superiores a 7 y con floculantes químicos.

La industria panelera trabaja alrededor del punto isoeléctrico del jugo, porque obtiene un mejor equilibrio de los azúcares (sacarosa y reductores). Ya que en pH mayores a 7, existe una mayor coagulación de las partículas iónicas, pero hay una menor inversión de la sacarosa, de forma que la panela toma coloraciones más oscuras y su textura y dulzor se ven afectados negativamente [7]. Así mismo, la hidrólisis química de la sacarosa es catalizada a pH menores de 5, 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 favorecen la formación de iones hidronio, creando de esta forma un círculo auto-catalítico que a su vez se ve favorecido por la temperatura [24], razón por la cual se afecta negativamente la dureza y solidificación de la panela.

Los mucilagos naturales utilizados en el proceso panelero, como floculantes, son polímeros, de peso molecular superior a 200.000 g/mol y con una gran afinidad por las superficies sólidas. Están compuestos de mucopolisacaridos que hacen parte del 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 [25]. Corpoica-Cimpa recomienda utilizarlos disgregados en agua, hasta formar una disolución de 0,006 Pa·s aproximadamente; adicionando un volumen de esta disolución igual al 2,5% del volumen del jugo, en dos aplicaciones, se disminuye en un 36% el contenido de sólidos insolubles en la panela [21]. En el proceso tradicional, el uso de una cantidad excesiva de estas disoluciones presenta problemas en la consistencia la panela [26].

Otro de los aspectos a tener en cuenta es la formación de la espuma en el proceso panelero se inicia, con el calentamiento del jugo, ya que el incremento de la temperatura favorece algunas reacciones químicas que liberan gas. El gas junto con el vapor producido durante la evaporación forma burbujas, que debido a la diferencia de densidad, ascienden a la superficie y quedan encapsuladas en la película de la capa superficial del jugo. La película es sometida a esfuerzos de estiramiento hasta su rompimiento; de tal 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 una 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 [27].

Una vez formada la espuma comienza su degradación, esto debido a la segregación gravitacional de las burbujas, al drenaje gravitacional del líquido, la succión capilar de la burbuja y la difusión gaseosa intra-burbuja. [28]. 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 (es decir a temprana vida de la espuma). De igual forma el aumento de la concentración de las sustancias surfactantes favorece la persistencia pero solo hasta alcanzar la concentración micelar crítica. En este momento el mayor grosor de la película comienza un lento descenso del tamaño de las burbujas y por ende de la espumabilidad [27]. De esta forma en el proceso panelero durante la evaporación el volumen de la espuma puede alcanzar hasta seis veces el volumen del jugo; mientras que cuando se alcanza aproximadamente los 70 °Brix y se inicia la concentración, el volumen de la espuma 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. Entre los métodos físicos se encuentran los métodos térmicos, electrónicos, mecánicos y de oscilación de presión entre otras. Entre los métodos químicos se encuentran el uso de compuestos tensoactivos sin propiedades estabilizadoras, que realizan cambios químicos en la capa de adsorción, dando una nueva estructura. En el proceso panelero para controlar la cantidad de espuma que se forma durante la evaporación del jugo de caña, la normatividad colombiana permite el uso de grasas y aceites vegetales grado alimenticio [28], uno de los más utilizados es el aceite de palma, refinado, blanqueado y desodorizado (RBD). Este tipo de antiespumante también actúa como antiadherente durante la concentración, para evitar que la miel se queme.

El uso de aceite de palma como antiespumante es económico y de fácil consecución; insoluble en el jugo, tiene una densidad y tensión superficial significativamente inferior a la del jugo por lo que flota y se requiere tan sólo de concentración del orden de partes por millón para esparcirse sobre toda la superficie. Adicionalmente 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 (de 45% a 55%) y una proporción relativamente pobre en ácidos grasos poliinsaturados (de 9% a 12%), características que le confieren durante el tratamiento térmico un punto de humeo superiores a 230°C y por tanto buena resistencia a la oxidación.

Sin embargo se debe tener en consideración que estos aceites son deteriorados por las altas temperaturas y trazas de cobre y hierro [29], y que el jugo de caña contiene además de los azúcares y el agua, sustancias solubles no azúcares, entre los que se encuentran sales de ácidos orgánicos e inorgánicos, ácidos carboxílicos, aminoácidos, proteínas, polisacáridos solubles, almidón, ceras y grasa y otros compuestos minoritarios, tales como flavonoides, polifenoles, fosfatos, compuestos de hierro y otros [30], cuyas proporciones dependen de la variedad de caña, las condiciones agroclimáticas y a edad del cultivo [23].

Otro factor a considerar es la variedad de la caña, ya que como se mencionó en el jugo de la caña se encuentran dispersas múltiples sustancias, además de la sacarosa y los azúcares reductores y la proporción de estas sustancias difiere con cada variedad de caña [31]. Además la mayoría de estas sustancias son insaturadas y muy reactivas, por lo que la variación de la composición del jugo, conlleva a que durante la evaporación se sigan diversas rutas químicas.

Por este motivo la selección, tiene un papel primordial en la capacidad productiva del cultivo, debido a la diversidad de condiciones de clima, suelo y manejo que existe en el país, convirtiéndose en un elemento fundamental para la competitividad y reducción de costos de producción [32].

Las variedades de caña presentan diferencias considerables; de forma que si tan sólo se considera, la edad de corte; que es tiempo en que la caña alcanza el índice de madurez o sea el punto donde la composición de los azúcares en la caña es homogéneo a lo largo de todo tallo, las variedades puede considerarse precoz o tardía, determinando periodos de cultivo entre los 8 y los 26 meses.

Otra de las diferencias entre las variedades es su rendimiento. En Colombia los rendimientos y por ende los costos de producción tanto de caña, como de panela dependen directamente de la adopción de tecnologías, como la variedad de caña, el manejo agronómico, la forma de corte y el tipo de hornilla. Así a lo largo de la geografía colombiana, se encuentran rendimientos de producción, en caña desde 6 hasta 20 kg/m<sup>2</sup> y en panela desde 0,041 hasta 0,155 kg por kg de caña, destacándose, la Hoya del río Suárez como la región de mayor rendimiento de caña.

En la Tabla 1 se muestran los rendimientos de producción de las variedades CC 86-45, PR 61-632 y RD 75-11 en la Hoya del Río Suárez, reportados por Corpoica-Cimpa. En ella también se muestran los valores de las variables fisicoquímicas reportadas en la misma publicación [33].

**Tabla 1. Rendimiento de las variedades de caña estudiadas y características fisicoquímicas del jugo, reportados en literatura.**

Variedad de caña	Concentración de sólidos solubles (°Brix)	Potencial de hidrógeno (pH)	Glucobrix (%p)	Pureza Pol (%p)	Coefficiente glucósido (%p)	Contenido de Fosforo (ppm)	Producción de caña (kg/m <sup>2</sup> )
CC 86-45	20,6	5,58	2,86	94,7	3,0	172	17,170
PR 61-632	20,3	5,92	6,40	93,1	6,9	534	14,570
RD 75-11	21,4	5,46	5,14	93,9	5,5	84	19,350

Fuente: Catalogo de Variedades de caña para la producción de panela en la Hoya del Río Suárez. [23]

Estos datos comprueban que en cada variedad de caña los compuestos se presentan en diferentes proporciones [34], y estas diferencias afectan la calidad del producto terminado, en factores como el color, turbidez textura y dureza, máxime si se tiene en cuenta que durante los procesos de evaporación y concentración la composición de todos los azúcares, varía dependiendo del pH del jugo y de la temperatura de operación [35]. Además existen otros factores que modifican el contenido final de sacarosa y las reacciones en la que esta participa, como es el contenido de fosfatos, calcio, fenoles y otros. De igual forma todos y cada uno de los componentes del jugo reaccionan de forma que las aguas evaporadas no son puras, sino que presentan distintos tipos de impurezas volátiles como, alcoholes y aldehídos, de acuerdo con las condiciones de operación y las cantidades y el tipo de los componentes iniciales del jugo [7].

Otro de los parámetros diferenciales entre las variedades es el color del jugo, el cual es el resultado de una mezcla altamente compleja de componentes que por su origen, son similares en su estructura física y química [36]. Los principales compuestos responsables del color en la caña son los pigmentos de clorofila, antocianas, flavonoides y otros que aunque no son coloreados son precursores del color tales como los compuestos fenólicos y derivados de los ácidos, benzoico y cinámico. Los compuestos de antocianinas están relacionados con los pigmentos de las plantas; varían de color entre rojo, rosa o anaranjado, estos pueden variar bajo ciertas condiciones, tales como la acidez, el calor [37] y la temperatura, De esta forma aunque la coloración de la

panela depende inicialmente de la variedad es modificada por las condiciones de proceso utilizadas.

Es importante destacar que no existen diferencias entre las variedades de caña para panela o azúcar, sólo hay diferencias en tecnologías de procesos y función objeto del sistema por lo que algunas características agronómicas o industriales exigidas por la industria azucarera no son estrictamente aplicables a la producción de panela. La industria panelera, además de las características agronómicas y fitosanitarias, busca en la caña características de proceso básicas como: altos contenidos de sacarosa, jugos fáciles de clarificar y de producir panelas de buena calidad y buen sabor, que ofrezca buenas alternativas de nuevos usos y presentaciones de producto con un alto porcentaje de extracción en el molino [33]

La industria panelera, además de las características agronómicas y fitosanitarias, busca en la caña características de proceso básicas como: altos contenidos de sacarosa, jugos fáciles de clarificar y de producir panelas de buena calidad y buen sabor, que ofrezca buenas alternativas de nuevos usos y presentaciones de producto con un alto porcentaje de extracción en el molino [32]. Sin embargo, estos conocimientos no son suficientes ya que la temperatura del sistema determina el tipo de reacciones y puesto que la panela mantiene la mayoría de los elementos constitutivos del jugo de caña, los productos resultantes de estos fenómenos, modifican la composición y características de la miel y la panela y por ende su calidad.

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 de la calidad de la panela, este trabajo se enfoca en determinar en laboratorio y bajo condiciones controladas el efecto de la presión y las variables variedad de la caña, densidad de flujo calórico y el uso del floculante, coadyuvante y antiespumante, sobre la calidad de la miel y panela durante el proceso de evaporación.

## 2 DISEÑO METODOLÓGICO

El objetivo de este trabajo se logró en tres etapas. En la primera bajo los criterios de la NTC-ISO-IEC 17025 [39], se configuró el sistema para simular a escala de laboratorio la evaporación del jugo a diferentes presiones y se creó la metodología para el almacenamiento y transporte del jugo clarificado. En la segunda etapa se utilizaron estos sistema y metodología para la obtención de las muestras de mieles y panelas de cada uno de los tratamientos según el diseño experimental correspondiente; controlando los efectos de ruido, que pudieran ser introducidos por las condiciones agroclimáticas del cultivo, el acopio, la extracción, la prelimpieza y la preparación de la muestra.

En esta etapa se determinó para cada muestra de jugo clarificado y miel, las propiedades físicas y de composición consideradas como determinantes de la calidad de la panela como son: color, turbidez, pH y contenidos de sólidos solubles, sacarosa, azúcares reductores, e insolubles; adicionalmente con el panel de expertos de Corpoica-Cimpa a las panelas se les analizó la solidificación, el brillo y la dureza. Estas características del jugo clarificado y de las mieles obtenidas por el proceso de evaporación tradicional y por evaporación a presiones superiores e inferiores a la atmosférica, fueron comparadas entre sí y evaluadas como positivas o negativas desde el punto de vista de la calidad, teniendo en cuenta los requerimientos fisicoquímicos de la panela, reglamentados en la resolución 779 del ministerio de protección social colombiano (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) [31]. A continuación se describe de una manera más detallada la metodología usada en este trabajo.

### 2.1 HIPÓTESIS

El flujo calórico, la cantidad de antiespumante (aceite de palma), y el uso de floculante (disolución de balsa) y coadyuvante (lechada de cal) durante la clarificación, no alteran la calidad de la panela producida en sistemas de

evaporación múltiple efecto, respecto a la panela producida en sistemas de evaporación abierta.

## 2.2 CRITERIO DE VALIDEZ Y CONFIABILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN.

Los factores que contribuyen a la variabilidad de un proceso de medida son numerosos [40], en este trabajo se consideraron como tales: los instrumentos de medida, los equipos y utensilios auxiliares, el personal implicado en la medición, la obtención y la manipulación de las muestras, el sistema agroclimático y los protocolos de laboratorio. Con el fin de minimizar la incidencia de estos:

- Se desarrolló una metodología, para la preparación y transporte terrestre de las muestras de jugo y mieles, a fin de asegurar la calidad y homogeneidad de la materia prima.
- Se montó y validó el sistema experimental de laboratorio, bajo los criterios de repetitividad y reproducibilidad fijados en la NTC-ISO-IEC 17025; su estandarización se realizó con 20 muestras de solución de sacarosa de 18°Bx, con la que se estableció un límite de confianza mayor o igual al 95%.
- Se minimizó el error sistemático de las medidas y los efectos de las variables de ruido durante la experimentación, usando la misma cal, aceite de palma y árbol de balsa. Cada tratamiento se replicó cuatro veces.
- Se realizaron los análisis químicos del jugo de caña, miel y panela, en los laboratorios del CIMPA y la UIS, con los equipos descritos en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y los protocolos validados para jugos, miel y panela; por Corpoica Cimpa.
- Se minimizó los efectos de ruido en la caña utilizada y la preparación de la muestra controlando las variables condiciones agroecológicas, manejo agronómico, índice de madurez, acopio extracción y pre-limpieza, como se muestran en el Tabla 2.

**Tabla 2. 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
Pre-limpieza	Filtración del jugo a la salida del molino.	Tamiz Retsch 25

Se analizó estadística y fisicoquímicamente los resultados obtenidos en el laboratorio (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

### 2.3 VARIABLES E INDICADORES

Como ya se mencionó, el objetivo es determinar el efecto de la presión y las variables variedad de caña, densidad de flujo calórico y uso de floculante, coadyuvante y cantidad de antiespumante, sobre la calidad de la panela. Con tal fin, se desarrollaron experimentos de evaporación a diferentes presiones y diferentes valores de las otras variables. En el caso de la presión se usaron cuatro valores, los cuales se especifican en la Tabla 3:

**Tabla 3. Valores experimentales de la presión del sistema de evaporación**

Presión (kPa)	Criterio de selección	Método de medición y control
Presurizado 103,392 ± 5	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, 959m.s.n.m.)
Vacío 35±5 15±5	Máximo vacío, prototipo EME cimpa Máximo vacío, en laboratorio	Regulador y manómetro de la bomba de vacío.

A partir de pruebas experimentales previas, llevadas a cabo usando agua destilada y posteriormente con jugo, se determinó los siguientes rangos de valores para cada una de las variables a estudiar:

- Densidad de flujo calórico: 17,857, 23,809 y 27,778 kW/m<sup>2</sup> (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** ).
- Cantidad de antiespumante utilizado: 0, 25 y 2000 µL de aceite de palma por litro de jugo, que corresponden, respectivamente, a la cantidad empleada normalmente en el trapiche y a 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.
- Uso del floculante y coadyuvante durante la clarificación: se utilizó las cuatro posibles combinaciones de balso (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y cal; en las cantidades y forma recomendadas por Corpoica-Cimpa (volumen de la disolución floculante igual al 2,5% volumen del jugo y pH del jugo clarificado de 5,7).
- Variedad de caña: Se seleccionaron entre las clasificadas como apropiadas para la producción de panela, en el catálogo de variedades de Corpoica 2003 y según el tipo de madurez (tardías, semi-tardía o medias y precoz). En la Tabla 4, se aprecian las tres variedades seleccionadas y las características fisicoquímicas de los jugos clarificados con calor.

**Tabla 4. Edad de corte las variedades experimentales y propiedades fisicoquímicas básicas de sus jugos clarificados con calor.**

Nombre de la variedad	Edad de corte (meses)	Sólidos solubles (°Brix)	Azúcares reductores (%)	Sacarosa (%)	pH	Color (UI)	Turbidez (UI)
Variedad1 (CC86-45)	17 (precoz)	18,3	0,52	17,2	5,58	7700	9683
Variedad2 (RD75-11)	18 (media)	21,8	0,99	20,1	5,60	8484	9207

<b>Variedad3 (PR61-632)</b>	20 (tardía)	22,0	1,08	20,2	5,58	8669	8764
-----------------------------	-------------	------	------	------	------	------	------

En la Tabla 5, se listan las variables de respuesta analizadas, así como el principio y la norma usada para la estimación experimental de estas. Adicionalmente, el color también se evaluó según la escala Munsell, en los parámetros de saturación, matiz y brillo.

**Tabla 5. Métodos de análisis de las variables de respuesta**

Parámetro	Principio	Método adaptado de:	Unidad de medida
<b>Azúcares reductores</b>	Volumétrico	Norma Técnica Colombiana (ICONTEC) NTC de 1779. Método Eynon-Lane.	porcentaje en peso (% <sub>p</sub> )
<b>Potencial de hidrógeno</b>	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
<b>Sólidos insolubles</b>	gravimétrico	Asociación de Análisis Químicos Oficiales (AOAC), 22.020 de 1984, y 922 de 1990.	porcentaje en peso (% <sub>p</sub> )
<b>Sólidos solubles</b>	Refractométrico	Organización Internacional de Normalización (ISO) 1741 de 1980	°Brix
<b>Sacarosa</b>	Polarimétrico	ICUMSA-GS1/2/3-5 de 1994	porcentaje en peso (% <sub>p</sub> )
<b>Color</b>	Fotométrico a 420nm	ICUMSA-GS1-7,1994	Unidades ICUMSA (IU <sub>color</sub> )
<b>Turbidez</b>	Fotométrico a 620nm	ICUMSA-GS1-7,1994	Unidades ICUMSA (IU <sub>turbidez</sub> )
<b>Fenoles</b>	Fotométrico a 650nm	ICONTEC NTC-234	Partes por millón (ppm)
<b>Fósforo</b>	Fotométrico a 670nm	ICONTEC NTC-234	Partes por millón (ppm)

Fuente: Protocolos para análisis de panela Corpoica-Cimpa

Con el fin de determinar el grado de hidrólisis de la sacarosa, se empleó como indicador el coeficiente glucósido o índice de glucosa, ya que cuando no hay inversión este permanece constante, mientras que al aumentar los azúcares reductores y disminuir la concentración de la sacarosa el coeficiente glucósido incrementa. Este coeficiente fue calculado usando la siguiente expresión:

$$\text{Coeficiente glucósido} = \frac{\text{Azúcares reductores (\%)}}{\text{Sacarosa (PoI)}} \cdot 100 \quad \text{Ecuación 2}$$

También se tomó en consideración que durante el proceso de evaporación, se pueden generar conclusiones erróneas acerca del comportamiento de la sacarosa o de los azúcares reductores, a consecuencia de la disminución de la inversión de la sacarosa, conforme se incrementa la concentración del jugo y de la posibilidad de que se registre como sacarosa, algunos azúcares reductores que presentan un cambio en la rotación química, durante la medición en el polarímetro. Como una forma de minimizar estos efectos, se usó las purezas, con las cuales se expresan las concentraciones con base en el total de sólidos solubles y no en el peso total de la solución. Para ello, 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. Las purezas de sacarosa (pureza Pol) y de azúcares reductores (también conocida como glucobrix o glucorate); están dadas por las expresiones:

$$\text{Pureza de sacarosa} = \frac{\text{Sacarosa Pol (\%)}}{\text{Sólido solubles (°Brix)}} 100 \quad \text{Ecuación 3}$$

$$\text{Pureza de reductores} = \frac{\text{Azúcares reductores (\%)}}{\text{Sólidos solubles (°Brix)}} 100 \quad \text{Ecuación 4}$$

## 2.4 DISEÑO EXPERIMENTAL

Debido al gran número de variables de estudio, se optó por el empleo de un arreglo experimental factorial, para cada una de las 4 variables (seleccionadas teóricamente) estudiadas conjuntamente con la presión; Este produce un total de 208 experimentos; especificados en el Tabla 6:

**Tabla 6. Diseño experimental.**

<b>Variables independientes estudiadas</b>	<b>Arreglo experimental</b>	<b>N° de tratamiento</b>	<b>N° de replica</b>	<b>N° de experimento</b>
<b>Presión y variedad de caña</b>	Factorial 4x3	12	4	48
<b>Presión y flujo calórico</b>	Factorial 4x3	12	4	48
<b>Presión y cantidad de antiespumante</b>	Factorial 4x3	12	4	48

## 2.5 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

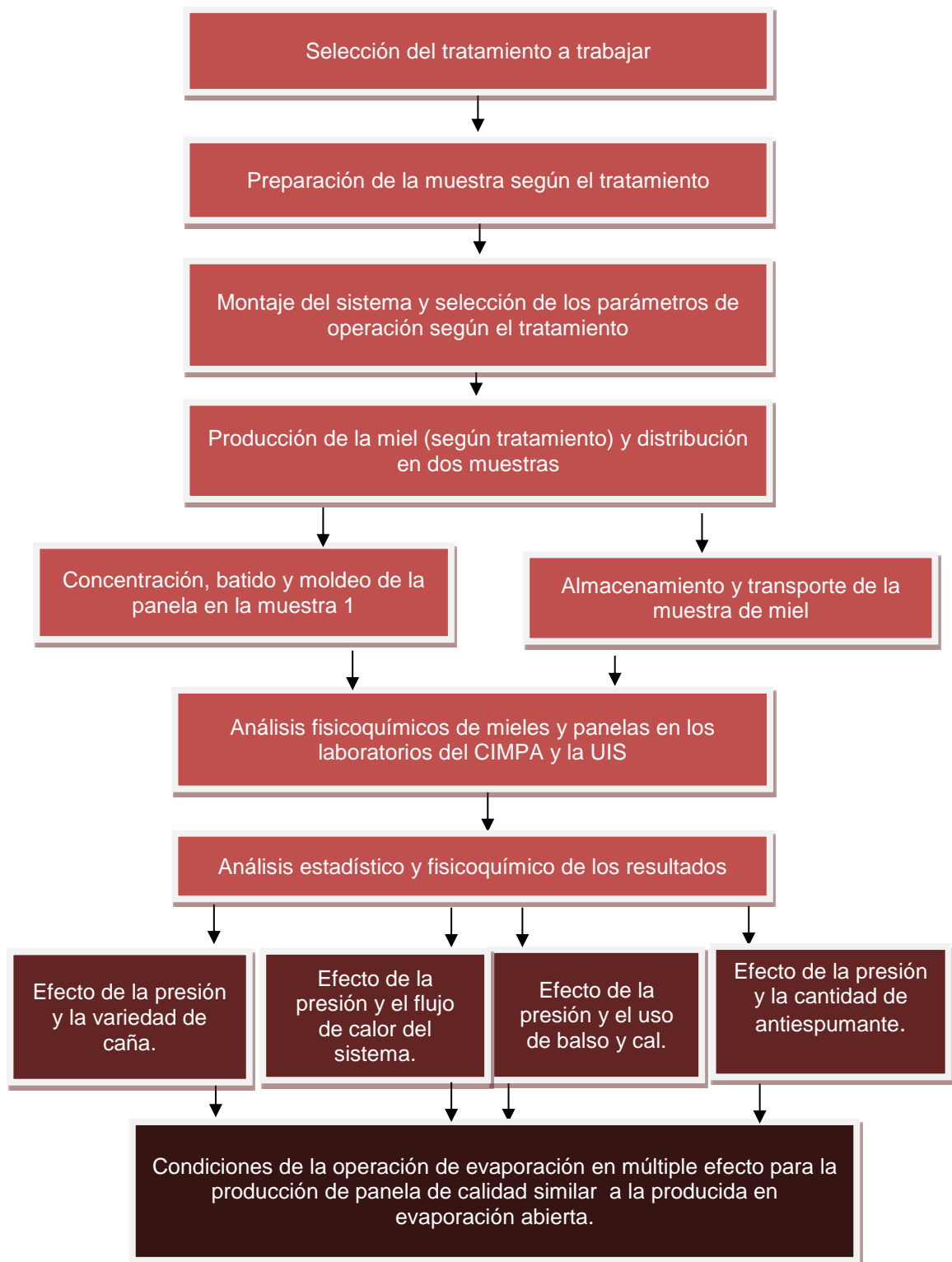
El presente trabajo de investigación, se desarrolló en dos etapas experimentales, cada una de ellas con su respectivo análisis. En la Figura 1 se observan las actividades de la primera etapa; que tuvo como fin, configurar los equipos de experimentación, para simular la operación de evaporación del jugo de caña a presiones mayor, igual y menor a la atmosférica

**Figura 1. Diagrama de flujo de la primera etapa experimental**



De igual forma en la Figura 2 se observan las actividades realizadas para el desarrollo de la segunda etapa, donde se determinó el efecto de la presión y las variables variedad de caña, densidad de flujo calórico y uso de floculante, coadyuvante y cantidad de antiespumante, sobre la calidad de la panela.

**Figura 2. Diagrama de flujo de la segunda etapa experimental**



### **2.5.1 Diseño del sistema de experimentación a escala de laboratorio para la evaporación de jugo de caña a diferentes presiones.**

A pesar de que Corpoica-Cimpa cuenta con un evaporador múltiple efecto a escala piloto que puede ser usado para realizar la experimentación antes mencionada, esto representaría un bajo control de las variables de operación y una alta inversión económica, por lo que se optó por simular en el laboratorio esta operación. Con este propósito se diseñó, montó y validó un sistema de evaporación del jugo de caña a diferentes presiones.

#### **2.5.1.1 Establecimiento de los parámetros de diseño:**

Para el desarrollo del sistema de evaporación además de las características de las operaciones del proceso panelero, las propiedades fisicoquímicas del jugo de caña, la miel y la panela, se tomó en consideración los siguientes aspectos:

- Para producir panela, la miel obtenida en el sistema abierto o en EME debe ser sometida posteriormente a una concentración, un batido y un moldeo (si es panela en molde). Estas operaciones posteriores a la investigación son de difícil control y su variación modifica de forma sustancial las características de la panela, aportando nuevas variables de estudio; motivo por el cual se deben analizar la miel producto de la evaporación y la panela.
- Para garantizar una densidad de flujo calórico similar en los tres sistemas de presión, el volumen del jugo, la capacidad calorífica y área de transferencia de calor debe ser similar aun cuando se modifique el sistema de presión.
- El recipiente que contiene el jugo durante la evaporación también se utiliza como intercambiador de calor; por tanto este debe ser resistente a la presión de trabajo, el flujo de calor aplicado y la continuidad de la experimentación en tiempo y trabajo. Adicionalmente debe permitir en lo

posible la observación directa o indirecta del comportamiento del jugo y miel durante el experimento.

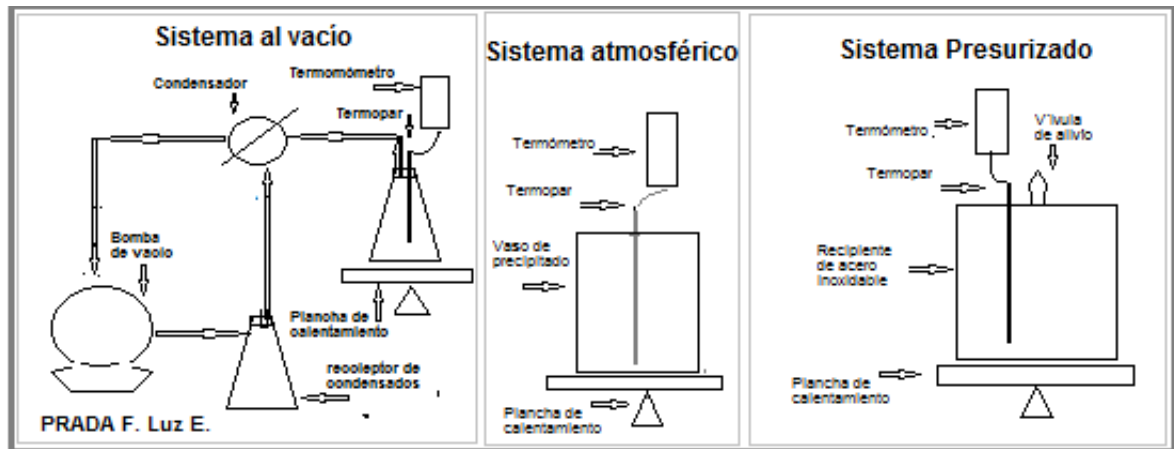
- Durante el desarrollo de cada experimento, se debe mantener en lo posible constante la presión y la densidad de flujo calórico; así mismo el efecto de estas variables debe poder suspenderse con rapidez, para impedir que prosiga la concentración de la miel después del punteo, que es el momento en el que se termina la evaporación y la miel tiene aproximadamente 70°Brix.
- El sistema debe permitir una estimación rápida del punteo de las mieles (momento en el cual se obtiene la concentración deseada), pues en esta etapa del proceso el cambio de concentración es muy rápida y puede además de alterar los resultados, quemar la muestra. Además la respuesta de los equipos para determinar en el sistema la densidad de flujo calórico, la presión o temperatura y el tiempo, debe ser de respuesta rápida (menor o igual a 0,1s), para asegurar la veracidad de los datos y la exactitud del punteo.
- En cada experimento el tamaño de la muestra obtenida (miel y panela), debe ser suficiente para ser analizada y guardar una contra-muestra. Así, con un balance de masa asumiendo que solamente se evapora agua y con datos de literatura y experimentales (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), se calculó el volumen mínimo de jugo clarificado requerido para producir la miel necesaria para analizar en el laboratorio. Volumen que se tomó como base para el cálculo de los requerimientos de miel para guardar las contra-muestras y producir las muestras de panela de 92 °Brix, asumiendo pérdidas por trasvaso del 20%. De esta forma se determinó que el volumen mínimo de jugo clarificado para cada experimento es de 0,5 L.

#### **2.5.1.2 Selección de equipos y utensilios para la simulación del proceso de evaporación del jugo en el laboratorio a diferentes presiones.**

Puesto que no fue posible encontrar un recipiente en material translucido que permitiera el intercambio de calor y la observación de los cambios ocurridos

durante el proceso, y a la vez soportara la presión y el vacío; para cada sistema de presión se debió realizar un montaje diferente, los cuales se observan en cada uno de los cuadros de la Figura 3.

**Figura 3. Sistema experimental para la evaporación del jugo de caña a diferentes presiones en el laboratorio**



- **Sistema de evaporación al vacío:** En este sistema (primer cuadro a la izquierda de Figura 4), se utilizó como intercambiador de calor un frasco para filtrar tipo Erlenmeyer, el cual cumple con la norma de seguridad DIN [41] y por tanto soporta un uso continuo, bajo condiciones de baja presión y calentamiento, además facilita la salida del vapor evitando su condensación. La capacidad del Erlenmeyer, se estableció proporcionalmente a la altura alcanzada por la espuma en el prototipo Cimpa del EME, y se ajustó posteriormente en el laboratorio, así se seleccionó un erlenmeyer de 2 L, con un área de transferencia de calor de  $0,020 \text{ m}^2$  y un calor específico de  $840 \text{ J/kg}\cdot\text{K}$ . Para la condensación del vapor producido, se usó una trampa de condensados y un sistema en contracorriente de refrigeración en espiral de  $0,25 \text{ m}$  de largo, que al estar conectado al sistema de vacío permite cerrar el sistema. Para la generación del vacío inicialmente, se empleó una bomba regulada manualmente, con la cual se obtuvo un vacío máximo de  $35 \pm 10 \text{ kPa}$ , con una gran oscilación. Se cambió a un sistema integrado de bomba de vacío, manómetro y regulador, con el que se consiguió, presiones de vacío de

hasta  $15\pm 5$  kPa. Es de resaltar que al reducir el rango de oscilación de la presión en las pruebas, se redujo la espuma notoriamente, hasta sólo una tercera parte del volumen del jugo. Con el fin de permitir el movimiento, en todas las conexiones se empleó manguera flexible para vapor.

- **Sistema de evaporación abierto:** El uso del erlenmeyer en este sistema (cuadro central de la Figura 4), se descartó, debido a que su geometría ocasionó condensación parcial del vapor y por ende se incrementó la presión del sistema hasta 101 kPa. Por ello se sacrificó en este sistema la recolección del condensado y utilizó un vaso de precipitado bajo de 2 L, un calor específico de 840 J/kg·K. y un área de transferencia de 0,019 m<sup>2</sup>. Este sistema además requiere de un altímetro.

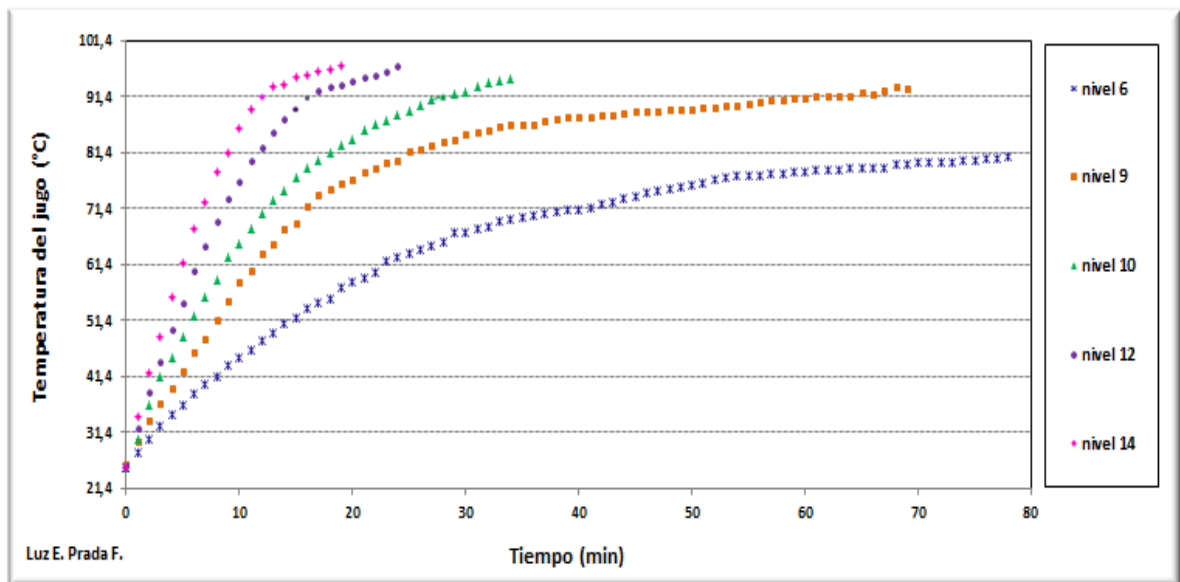
- **Sistema de evaporación a presión mayor a la atmosférica:** Puesto que con el Erlenmeyer tampoco se logró la estabilidad y resistencia requerida por el sistema presurizado, en este sistema (Figura 4, cuadro a la derecha) se debió acudir un recipiente en acero inoxidable de 2 L, con un área de transferencia de calor de 0,019 m<sup>2</sup>, cierre externo para mayor seguridad, y válvulas de alivio, control y seguridad. La válvula de alivio permitió 103 kPa. Este recipiente tiene un calor específico de 510 J/kg·K diferente a los sistemas anteriores. Además no permite recuperar los condensados ni observar los cambios, por tanto para poder determinar la cantidad de espuma y cachaza formada, se acudió a la observación de la superficie interior del recipiente una vez concluido el experimento. En la tapa superior del equipo se ubicaron las válvulas de alivio, de seguridad, el manómetro y el termopar.

En los tres sistemas se usó un cronómetro y una placa de calentamiento de vitro-cerámica con 24 niveles de calentamiento, y un área de transferencia de calor de 0,0189 m<sup>2</sup> similar al fondo de los recipientes (diámetro de 0,0155 m) la cual permitió un mayor flujo calórico, alta estabilidad, bajo calentamiento de los alrededores y una repetitividad del 99% en los datos de temperatura versus tiempo. Para determinar la temperatura de punteo, se instaló inmerso en el jugo, un termopar flexible en acero inoxidable de 0,003 m de diámetro.

### 2.5.1.3 Selección de los valores de flujo calórico:

Con el fin de determinar los valores de flujo calórico a usar durante la experimentación, se realizaron pruebas de evaporación en el sistema a presión atmosférica, con una muestra de 0,5 L de agua y flujo de calor constante, con los niveles de calentamiento de la plancha de: 6, 9, 10, 12, 14 y 15. Los resultados de estas pruebas se muestran en la Figura 4.

**Figura 4. Velocidad de calentamiento hasta alcanzar la ebullición del jugo de caña, para diferentes niveles de calor de la placa.**



En estas pruebas con los niveles de calentamiento de la plancha menores a 9, no se alcanzó la ebullición y con los superiores a 15, la alta velocidad de calentamiento, dificultó la toma de los datos experimentales, por lo que el calentamiento de la placa, se limitó a un rango entre 9 y 14.

Al experimentar con jugo se observó que el aumento de la temperatura del jugo, no es constante sino que va disminuyendo a medida que se acerca al punto de ebullición con pendientes directamente proporcionales al nivel de calentamiento, al igual que ocurre con el del agua pura. Para cada caso la velocidad de calentamiento, se calculó a partir de la pendiente de cada una de

las curva para el rango de temperatura entre 25°C y 91,4°C (temperatura en la cual se desprende la primera burbuja). De esta forma los niveles de calentamiento de la plancha seleccionados para la experimentación fueron 9, 12 y 14; para los cuales corresponden las velocidades de calentamiento promedio de 1,1, 4,1 y 5,5 °C/min, respectivamente.

### **2.5.2 Metodología para la obtención, conservación y transporte de las muestras.**

Para asegurar la homogeneidad y calidad de la materia prima durante la obtención, el transporte y almacenamiento se creó la siguiente metodología:

El jugo extraído de la caña en el molino filtrado, se calentó a una velocidad de 1,5 °C/min, para coagular las partículas coloidales y las sustancias iónicas, suspendidas en él. Cuando alcanzó aproximadamente los 90°C, se le retiró la cachaza rápidamente, antes que el jugo alcanzara la temperatura de ebullición.

Después de dos minutos de ebullición, el jugo se retiró del calor, se dejó enfriar a temperatura ambiente hasta alcanzar los 35 °C, se pasó por un tamiz Retsch 100, se dosificó en porciones de 0,5 L (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y se empacó en bolsas de PVC.

Estas bolsas se congelaron durante 3 días y se transportaron a los laboratorios de la UIS, en nevera de ICOPOR. Una vez en el laboratorio de la UIS, se almacenaron las bolsas de jugo, en un congelador de uso exclusivo, hasta por cuatro meses.

## **2.6 ANÁLISIS ESTADÍSTICO**

En el análisis de los resultados de laboratorio se utilizaron, los programas estadísticos Excel Starter 2010 y SPSS 20.0. Para determinar las diferencias con los resultados del tratamiento patrón, se utilizaron pruebas multi-variables, con intervalos de confianza del 95%. Para establecer las diferencias

significativas en las comparaciones múltiples por parejas se identificaron todas las posibles combinaciones lineales de las medias de grupo con las pruebas post hoc de Tukey en las cuales se asume varianzas iguales y estudian los intervalos de confianza seleccionando los tratamientos con igual media. La significancia, se midió con probabilidades de rechazo de la hipótesis nula ( $\alpha$ ) menor de 0,05 y menor de 0,01 y para cada curva se determinó, el grado de dependencia lineal debida a la proporción de la varianza de las variables densidad del flujo calórico, uso del floculante y coadyuvante, cantidad de antiespumante y variedad de caña, que puede atribuirse a la varianza de la concentración del jugo clarificado (con calor y sin floculante, ni coadyuvante) hasta producir la miel, a través del coeficiente de determinación ( $R^2$ ). Los resultados de este análisis se observan en el **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

### **3 EFECTO DE LA PRESIÓN DE EVAPORACIÓN Y LA DENSIDAD DE FLUJO CALÓRICO SOBRE LA CALIDAD DE LA MIEL Y LA PANELA**

En este capítulo del trabajo se presentan y analizan los resultados con los que se buscó definir a partir de datos experimentales el efecto de la presión y la densidad de flujo calórico sobre la calidad de la panela; variables que se estudiaron debido a los cambios en la apariencia de la panela que se presentan cuando el tiempo de residencia del jugo aumenta en los evaporadores de la hornilla panelera tradicional [21]. Cambios en la calidad de la panela en aspectos como intensificación de la dulzura, del olor y sabor, oscurecimiento de las tonalidades de color y disminución de la dureza y del tiempo de vida útil.

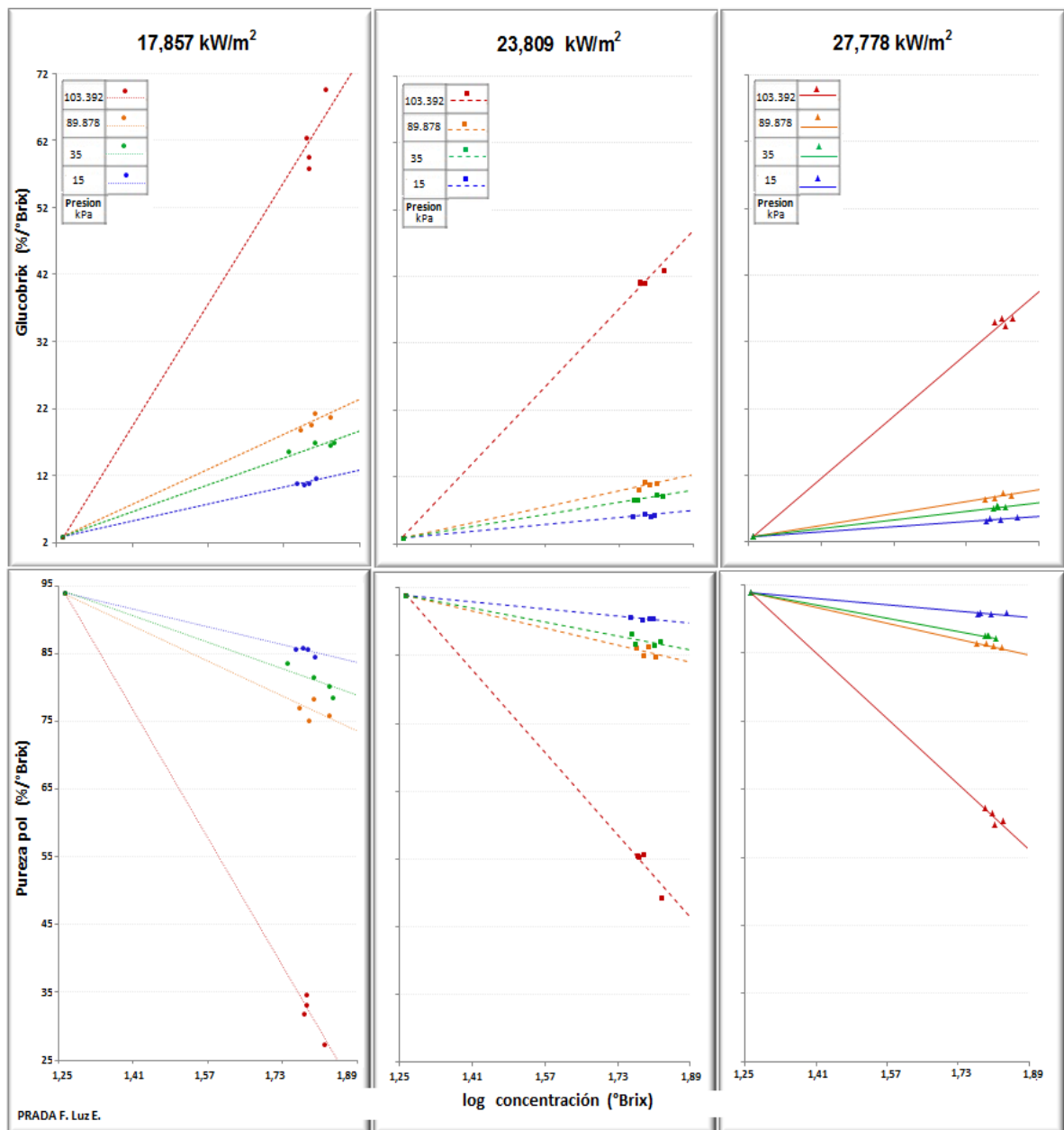
#### **3.1 EFECTO DE LA PRESIÓN DE EVAPORACIÓN Y LA DENSIDAD DE FLUJO CALÓRICO SOBRE LOS SÓLIDOS SOLUBLES**

En la Figura 5 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 desde la concentración del jugo (inicial).

En ella puesto que la concentración de sacarosa y azúcares reductores están directamente relacionados a la pureza Pol y el glucobrix respectivamente, se puede confirmar 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. Esta tendencia es similar a la presentada para la inversión de la sacarosa en medio débilmente ácido [19]. Además el análisis estadístico también muestra, la relación inversa reportada en literatura [35], 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 azúcares reductores y glucobrix pero difirieron en su dureza de la panela.

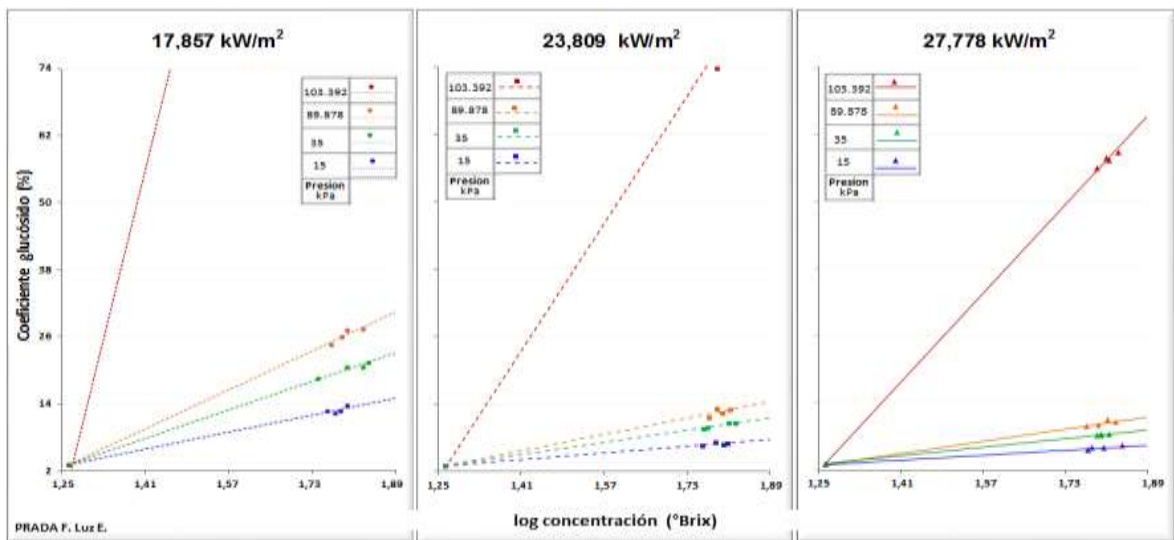
**Figura 5. Efecto de la Presión evaporación y la densidad de flujo calórico sobre la pureza Pol y el glucobrix de la miel y la panela**



En la Figura 6 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. 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 6. Efecto de la presión y la densidad de flujo calórico del sistema sobre el coeficiente glucósido de la miel de caña a diferentes concentraciones.**



En la Figura 6 se aprecia una gran diferencia entre los valores de coeficientes glucósidos alcanzados en los tratamientos con densidades de flujos calóricos de  $17 \text{ kW/m}^2$  y en los tratamientos del sistema presurizado. 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.

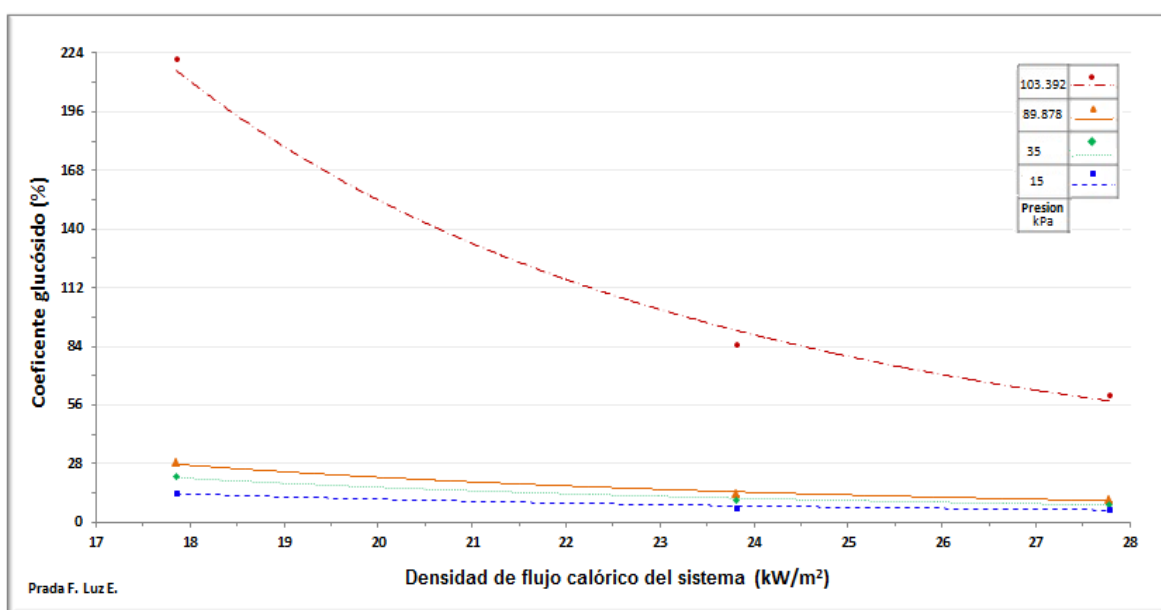
La Tabla 7 muestra la influencia y significancia estadística que presentan las variables presión y densidad de flujo calórico sobre el coeficiente glucósido, así como la dependencia que presentan entre sí, cada uno de los tratamientos de dichas variables a través de la formación de subconjuntos; resultados que confirman las observaciones realizadas en la Figura 6.

**Tabla 7. Resumen del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión y la densidad de flujo calórico 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
Densidad de flujo calórico	Influye sig. <0,01	17 kW/m <sup>2</sup>		27 y 23 kW/m <sup>2</sup>
Presión-Flujo	Influye sig. <0,01			

Una mejor vista de estas diferencias se obtiene en la Figura 7 donde se graficó el coeficiente glucósido contra el flujo calórico para mieles a 70 °Brix, se aprecia una tendencia potencial del coeficiente glucósido a disminuir a medida que aumenta el flujo calórico, con valores de R<sup>2</sup> entre 0,9792 y 0,9908.

**Figura 7. Efecto de la presión de evaporación y la densidad de flujo calórico del sistema sobre el coeficiente glucósido de la miel de caña de 70°Brix**



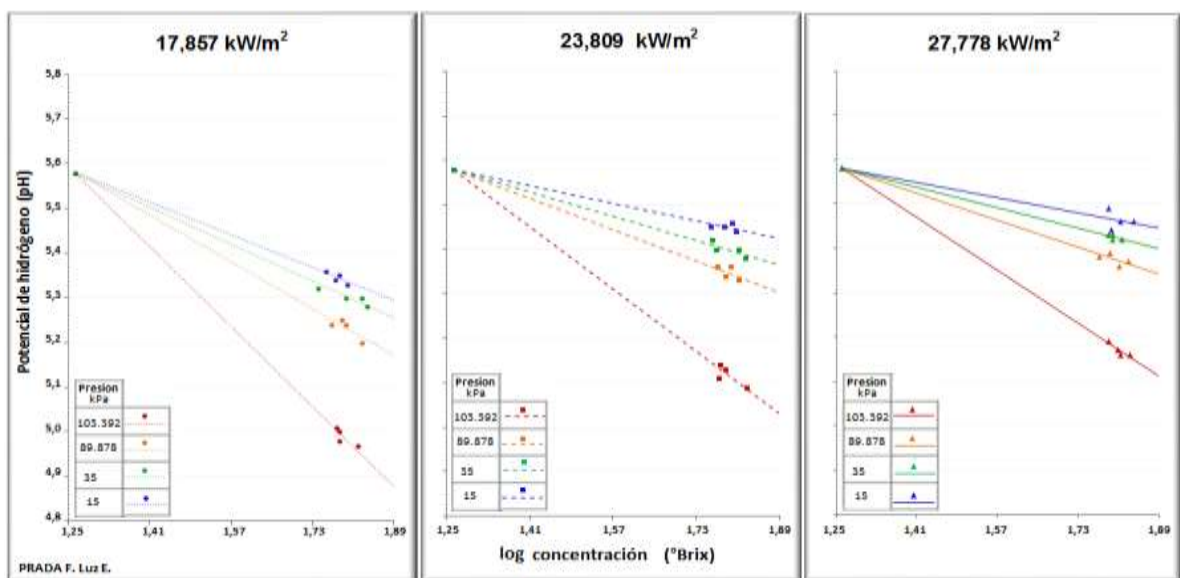
En ella se aprecia nuevamente que el coeficiente glucósido de las mieles obtenidas en los tratamiento a alta presión alcanza valores que son de 3 a 7 veces los valores alcanzados por las mieles producidas en sistemas abiertos, de forma que las mieles de sistema presurizado presentan grandes diferencias en las características fisicoquímicas, entre las que se destaca el hecho de que no logra la solidificación.

Es de resaltar que la 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 con consistencia blanda, y las mieles con coeficiente glucósido superior 56% no lograron la solidificación para producir panela. Por lo que se hace necesario que en un sistema de evaporación en el que se combinen las presiones; los sistemas presurizados se utilicen el menor tiempo posible y con una densidad de flujo calórico mor a 24 kW/m<sup>2</sup>.

### 3.2 EFECTO DE LA PRESIÓN DE EVAPORACIÓN Y LA DENSIDAD DE FLUJO CALÓRICO SOBRE EL POTENCIAL DE HIDRÓGENO

Como se aprecia en la Figura 8 para los cuatro valores de presiones del sistema de evaporación y los tres valores de densidades de flujo calórico experimentados, las curvas de pH presentan la tendencia a disminuir logarítmicamente al aumentar la presión y el logaritmo de la concentración de los sólidos solubles presentes en la miel medidos en °Brix, con un valor de R<sup>2</sup> entre 0,9419 y 0,9981. Estas curvas al ser extrapolada coincide con el pH del jugo clarificado.

**Figura 8. Efecto de la presión de evaporación y la densidad de flujo calórico sobre el pH de la miel de caña.**



La industria azucarera acepta un descenso del pH de hasta una unidad, siempre y cuando el pH de la miel no sea inferior a 6,0 [21]; sin embargo aunque en la industria panelera aún no se ha definido este valor, 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 [22].

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 8 también se observa que para cada presión estudiada los valores del coeficiente glucósido forma un subconjunto y en cada uno de ellas los valores de cada densidad de flujo calórico forman tres subconjuntos, corroborando así los resultados del análisis estadístico resumido en la Tabla 8.

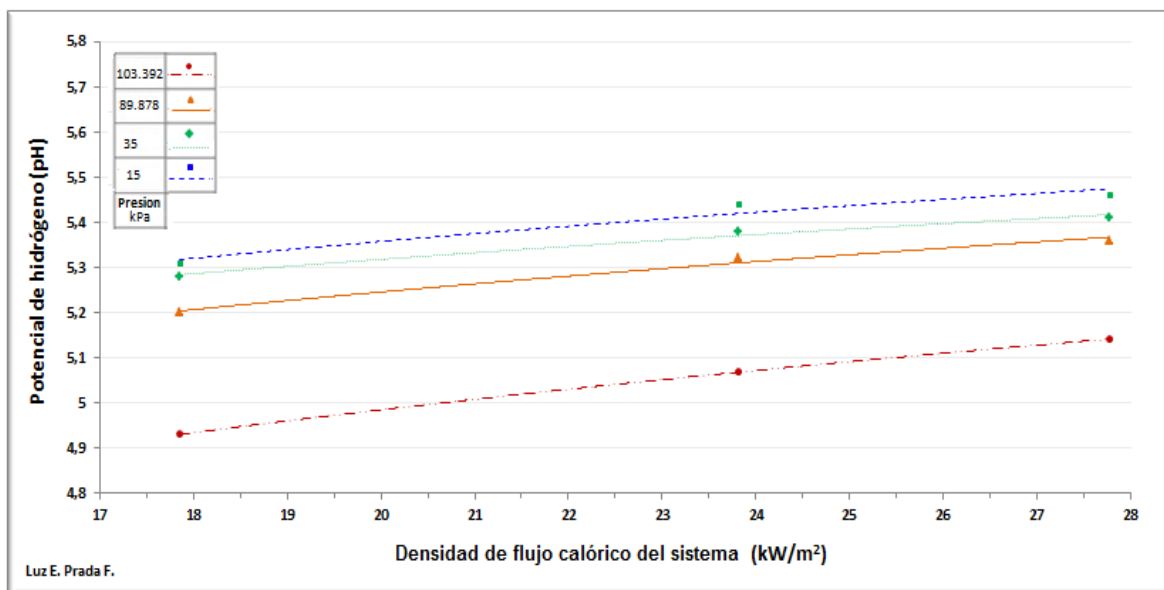
**Tabla 8. Resultados del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión y la densidad de flujo calórico sobre potencial de hidrógeno de la miel**

Variable de estudio	influencia significancia	Subconjuntos homogéneos (Dependencia)			
presión	Influye sig. <0,01	103 kPa	89 kPa	35 kPa	15 kPa
Densidad de flujo calórico	Influye sig. <0,01	17 kW/m <sup>2</sup>	27 kW/m <sup>2</sup>	23 kW/m <sup>2</sup>	
Presión-Flujo	No influye				

Para una mayor claridad en la Figura 9, se graficaron las curvas del potencial de hidrógeno contra la densidad de flujo calórico, para las mieles de 70 °Brix y para las cuatro presiones experimentales. En ella se observa, una tendencia del pH a aumentar logarítmicamente a medida que aumenta el flujo calórico, con un valor de R<sup>2</sup> entre 0,9490 y 0,9997.

Este cambio en el valor del pH durante la evaporación del jugo de caña, se origina 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 y su precipitación [23]. Adicionalmente, el aumento de la concentración de los iones hidrógeno favorece la hidrólisis de la sacarosa y por tanto el aumento de la concentración de los azúcares reductores.

**Figura 9. Efecto de la presión de evaporación y la densidad de flujo calórico sobre el pH de la miel de caña de 70°Brix**



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 auto-cataliza esta reacción [15].

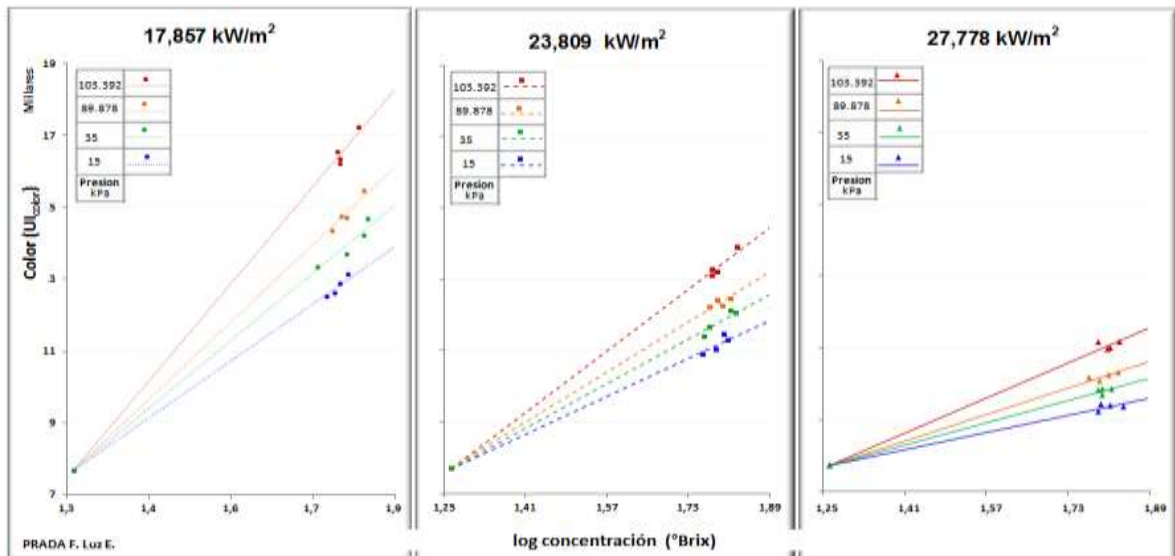
De igual forma, las reacciones de caramelización también son autocatalizadas por el aumento de la acidez y por ende una disminución del pH. Como además estos procesos de caramelización se ven favorecidos por las bajas densidades de flujo calórico, entonces la mayor cantidad de azúcares caramelizados 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 aumento de la acidez debido a la piezoelectricidad del agua [17]. 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.

### 3.3 EFECTO DE LA PRESIÓN DE EVAPORACIÓN Y LA DENSIDAD DE FLUJO CALÓRICO SOBRE EL COLOR Y EL SABOR

Los datos experimentales del color de la miel, contra el logaritmo de la concentración de los sólidos solubles presentes en la miel, se graficaron en la Figura 10, 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 10. Efecto de la presión evaporación y la densidad de flujo calórico sobre el color de la miel de caña.**



Como se puede observar de los datos graficados durante la evaporación del jugo de caña clarificado, el color presenta una tendencia a aumentar logarítmicamente

al aumentar la concentración de la miel, e inversamente a la presión del sistema con un valor de  $R^2$  entre 0,9351 y 0,9993. Este comportamiento es similar para cada presión y densidades de flujo calórico estudiados, cuyos valores difieren uno de otro; corroborando los resultados del análisis estadístico que se reportan en la Tabla 9

**Tabla 9. Resultados del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión de evaporación y la densidad de flujo calórico sobre el color de la miel**

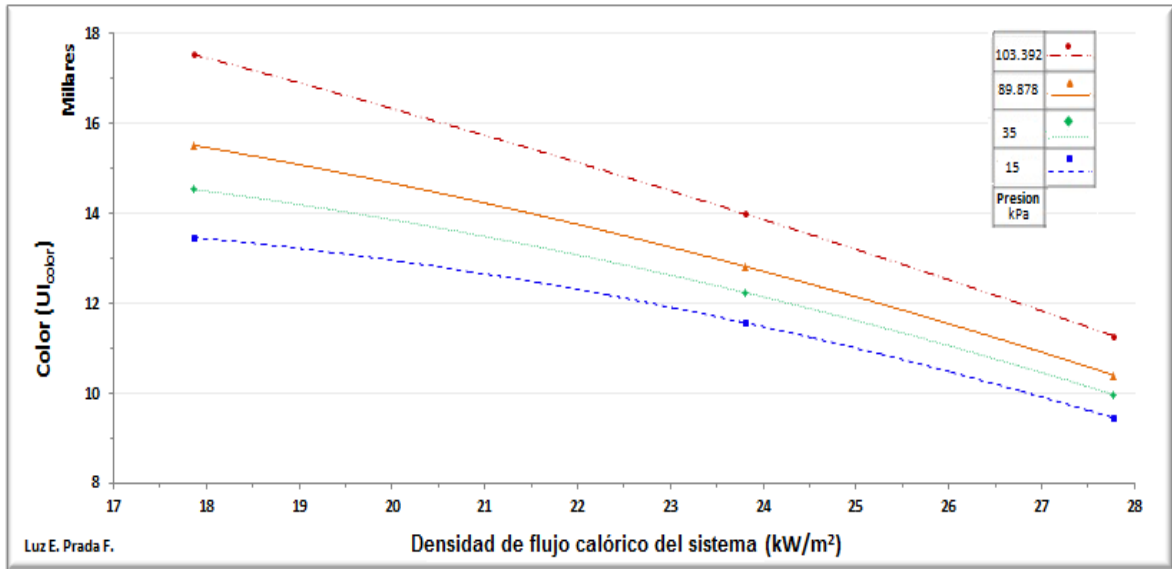
Variable de estudio	influencia significancia	Subconjuntos homogéneos (Dependencia)			
presión	Influye sig. <0,01	103 kPa	89 kPa	35 kPa	15 kPa
Densidad de flujo calórico	Influye sig. <0,01	17 kW/m <sup>2</sup>	27 kW/m <sup>2</sup>	23 kW/m <sup>2</sup>	
Presión-Flujo	Influye sig. <0,01				

Este comportamiento es similar al observado en los estudios de caramelización de los azúcares a diferentes temperaturas [20]; por lo que se puede afirmar que el grado de caramelización de los azúcares durante la evaporación, es proporcional a la temperatura de evaporación e inverso al flujo calórico; de forma tal que la mayor caramelización la presentan las mieles de los tratamientos a 103,392 kPa y 17,857 kW/m<sup>2</sup>.

Para facilitar el análisis de esta información en la Figura 11, se graficó, el color de las mieles con una concentración de 70 °Brix contra la densidad del flujo calórico del sistema, para cada una de las cuatro presiones experimentales.

En ella además, se observa que el color de la miel presenta una tendencia lineal a disminuir a medida que aumenta la densidad del flujo calórico, con un  $R^2$  0,7900 a 0,9986. De esta forma, los tratamientos de mayor presión y por ende con temperaturas de ebullición altas, se realizan en el menor tiempo y favorecen las reacciones de caramelización de los azúcares; por lo que las mieles de los estos tratamientos presentaron los valores de color más altos y por ende más oscuros. Resultados que concuerdan con las observaciones hechas en la estación azucarera de Pasuruan en Java, entre 1927 y 1940 [7].

**Figura 11. Efecto de la presión de evaporación y la densidad de flujo calórico sobre el color de la miel de miel a 70°Brix**



Es importante tener presente que la caramelización en el jugo de caña, se da a nivel de toda la mezcla de azúcares que se encuentran en solución en el jugo de caña y por tanto la caramelización se presenta a temperaturas de evaporación menores a los 120°C, que es la temperatura de caramelización de la sacarosa. Adicionalmente la existencia de los múltiples compuestos de la caramelización también permite dar una explicación a la gran variación del color durante la evaporación del jugo y el almacenamiento de la panela, debido a la baja estabilidad de estos compuestos hidrosolubles [37].

Los compuestos producto 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 [38], 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 [42], condiciones utilizadas en el proceso panelero.

Por otra parte al analizar el color de la miel con la escala de color Munsell se encontró un tono de color de 2.5YR (rojizas oscuras) para las mieles elaboradas en sistemas presurizados, uno 5YR (amarillas rojizas) para las mieles del sistema abierto y uno 7.5YR (amarillas claras) para los sistema al vacío. Cabe anotar que aun cuando en 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 priman en estas muestras, es una característica propia de los azúcares caramelizados [20].

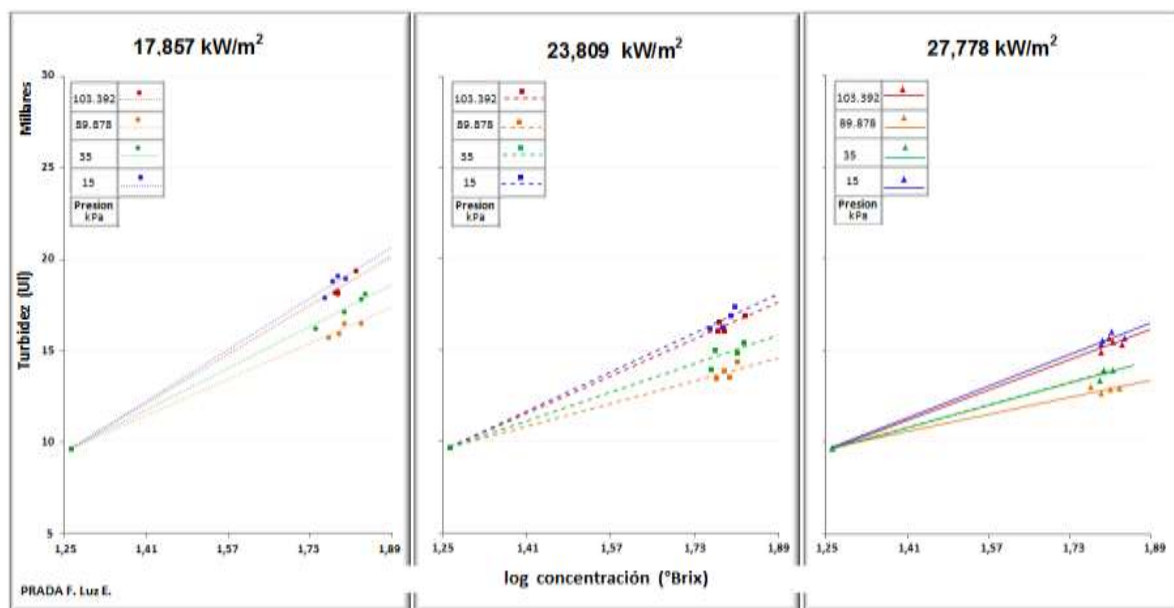
También se observa un aumento en la pureza del color al aumentar la concentración en la miel y un aumento de la intensidad del color en las mieles de los sistemas presurizados y al vacío. De forma que en los sistemas de evaporación al vacío se producen panelas de coloraciones amarillentas y los sistemas abiertos se produce una tonalidad amarilla rojiza. También se encontró que las panelas producidas en sistemas presurizados se presentan 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.

### **3.4 EFECTO DE LA PRESIÓN Y LA DENSIDAD DE FLUJO CALÓRICO SOBRE LA TURBIDEZ**

En la Figura 12, 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 de flujo calórico estudiadas,

con valores de  $R^2$  entre 0,8996 y 0,9923. Estas curvas de turbidez mantienen su tendencia al ser extrapoladas hasta el valor de turbidez del jugo clarificado.

**Figura 12. Efecto de la presión y la densidad de flujo calórico sobre la turbidez de la miel de caña.**



En la figura 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 que se resumen en la Tabla 10.

**Tabla 10. Resumen del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión de evaporación y la densidad de flujo calórico sobre la turbidez de la miel**

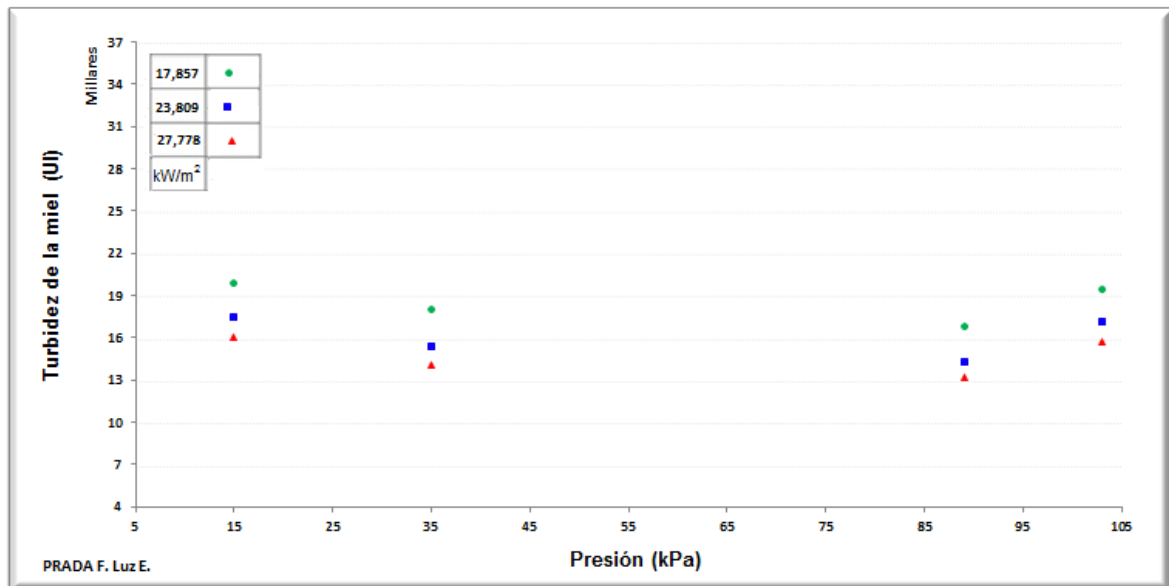
Variable de estudio	influencia	significancia	Subconjuntos homogéneos (Dependencia)		
presión	Influye sig.	<0,01	103 y 15 kPa	89 kPa	35 kPa
Densidad de flujo calórico	Influye sig.	<0,01	17 kW/m <sup>2</sup>	27 kW/m <sup>2</sup>	23 kW/m <sup>2</sup>
Presión-Flujo	No influye				

Estos datos estadísticos también muestran correlación entre la turbidez y el color de la panela, de forma que una mayor turbidez le proporciona a la miel,

la panela y las bebidas con ella preparadas, una apariencia opaca y oscura afectando directamente la intensidad y la pureza del color y las bebidas cuando sedimentan, presentan una pequeña cantidad de precipitado de color negruzco y una cachaza negruzca sobrenadante en la superficie de la miel.

Para visualizar con mayor claridad el efecto de la presión en la Figura 13, se graficó la turbidez contra la presión, de las muestras de miel con una concentración de sólidos solubles 70 °Brix; para las cuatro presiones y las tres densidades de flujo calórico estudiadas. En la Figura 13 se aprecia una posible tendencia polinómica de segundo grado con valores de  $R^2$  entre 0,8814 y 0,9415, la cual requiere para su comprobación una mayor experimentación en valores cercanos a la presión atmosférica

**Figura 13. Efecto de la presión de evaporación y la densidad de flujo calórico sobre la turbidez de la miel de caña de 70°Brix.**



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) [7].

De esta forma, durante la clarificación del jugo, al iniciarse el calentamiento, se inicia la coagulación de algunas partículas coloidales, las cuales forman complejos iónico-micelares que pueden alcanzar el tamaño apropiado para precipitarse o flocular, incrementando de esta forma el contenido de sólidos insolubles y de partículas que pueden ser removidas por métodos físicos, otras se re-disuelven y algunas no alcanzan el tamaño apropiado para precipitarse o solubilizarse.

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 son bajas y por tanto las mieles de estos sistemas presentan una mayor turbidez que las mieles producidas a presión atmosférica. Pero si bien la temperatura facilita la coagulación también puede contribuir, a la descomposición del complejo iónico-micelar debido a la fuerza y cantidad de choques entre las partículas, explicando así, la mayor turbidez de los tratamientos presurizados.

Adicionalmente, el complejo iónico-micelar durante el calentamiento absorbe agua y se hincha hasta reventar; de forma que el tamaño y estabilidad de la micela formada, depende de la capacidad que tienen las sustancias formadas para absorber el agua y del tiempo de procesamiento [19]. 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 presentó un precipitado de color negruzco en el fondo y una cachaza negruzca sobrenadante en la superficie de la miel, cuyo volumen es cinco veces el volumen de precipitado. Estos sedimentos se deben en gran medida al hecho de no usar un floculante lo cual conlleva una deficiente clarificación del jugo de caña.

## 4 EFECTO DE LA PRESIÓN DE EVAPORACIÓN Y LA CANTIDAD DE ANTIESPUMANTE, SOBRE LA CALIDAD DE LA MIEL Y LA PANELA

Cuando se utiliza un exceso de antiespumante, para minimizar la cantidad de espuma formada durante la evaporación del jugo de caña, en sistemas abiertos, se presentan problemas en el sabor y la textura de la panela; motivo por el cual el objetivo de esta parte del trabajo fue comparar el efecto de la cantidad de antiespumante (aceite de palma) utilizado durante la operación de evaporación del jugo de caña en sistemas presurizados y al vacío, sobre la calidad de la panela.

### 4.1 EFECTO DE LA PRESIÓN DE EVAPORACIÓN Y LA CANTIDAD DE ANTIESPUMANTE SOBRE LOS SÓLIDOS SOLUBLES

En la Tabla 11 se reporta un resumen del análisis estadístico de los resultados experimentales para determinar el efecto de la presión y la cantidad de antiespumante utilizado sobre el coeficiente glucósido de la miel.

**Tabla 11. Resultados del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión y cantidad de antiespumante sobre el coeficiente glucósido de la miel**

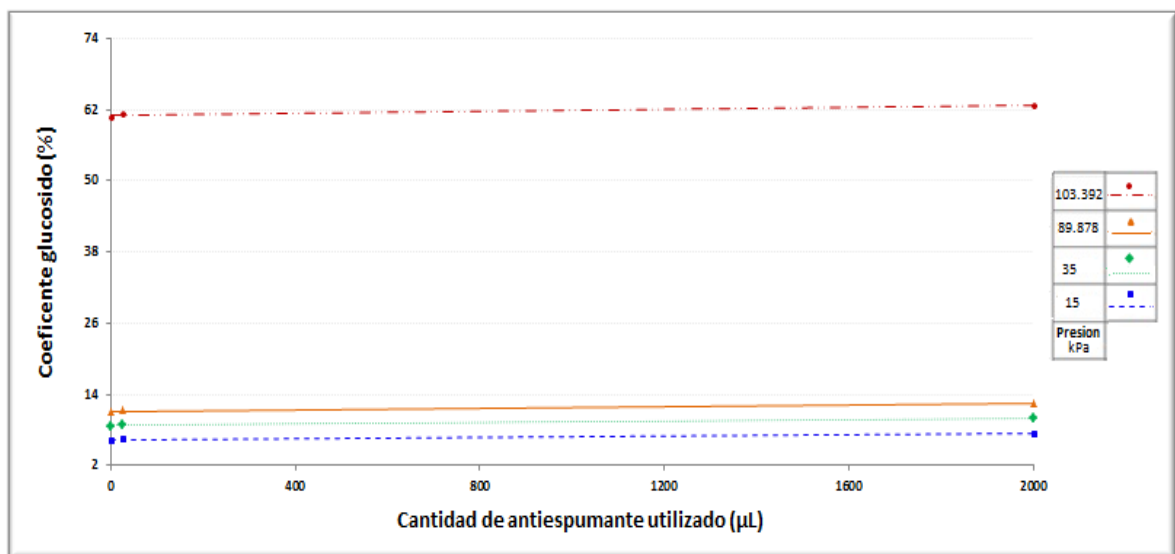
Variable de estudio	influencia significancia	Subconjuntos homogéneos Dependencia)		
Presión	Influye sig. <0,01	103 kPa	89 y 35 kPa	15 kPa
Cantidad antiespumante	No influye	0, 25 y 2000 µL		
Presión - antiespumante	No influye			

Puesto que los valores de coeficiente glucósido para todas las cantidades de antiespumante estudiadas forman un único subconjunto, se puede afirmar que en los tratamientos con antiespumante, el ácido palmítico se reduce catalizado por la temperatura y los iones de hierro presentes en el jugo. Sin embargo el aumento en el valor del coeficiente glucósido de estos tratamientos no es significativo estadísticamente.

Estos mismos resultados se observan al graficar el coeficiente glucósido contra el logaritmo de la concentración de la miel en °Brix, para los cuatro valores de presión y las tres cantidades de antiespumante estudiadas, ya que el coeficiente glucósido aumenta 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, y mantienen la tendencia al ser extrapolada hasta los valores de coeficiente glucósido del jugo clarificado sin floculante ni coadyuvante.

Por tanto facilitar su estudio se graficó en la Figura 14, 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.

**Figura 14. Efecto de la presión de evaporación y la cantidad de antiespumante sobre el coeficiente de glucósido de la miel de caña de 70°Brix**



En ella se observó que el coeficiente glucósido presenta, una tendencia lineal a aumentar a medida que aumenta la densidad del flujo calórico, con un  $R^2$  entre 0,9490 y 0,9970; pero que la pendiente de estas líneas es del orden de  $10^{-4}$ . Por lo que se puede afirmar que la cantidad de antiespumante utilizado para la evaporación del jugo de caña, no altera las reacciones de hidrólisis de la sacarosa, ni las concentraciones de azúcares reductores y sacarosa de la miel.

Además se aprecia una gran diferencia entre los coeficientes glucósidos de las mieles producidas en sistemas presurizados y los demás sistemas, debido a que las altas temperaturas alcanzadas en el sistema presurizado favorecen la gran inversión de los azúcares; así mismo se observa que las diferencias entre los tratamientos de una misma presión y con diferente cantidad de antiespumante apenas se perciben.

#### 4.2 EFECTO DE LA PRESIÓN Y LA CANTIDAD DE ANTIESPUMANTE SOBRE EL POTENCIAL DE HIDRÓGENO.

La Tabla 12 muestra un resumen de los resultados del análisis estadístico, en la cual se aprecia diferencias significativas en los valores de pH al variar la presión y al aumentar excesivamente la cantidad de antiespumante.

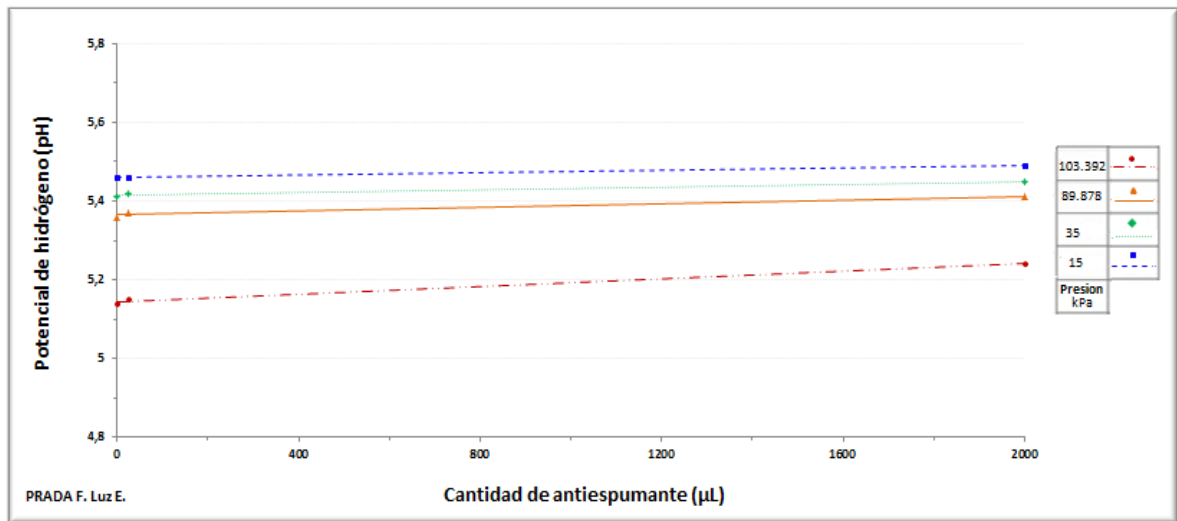
**Tabla 12. Resultados del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión y cantidad de antiespumante sobre el pH de la miel**

Variable de estudio	influencia significancia	Subconjuntos homogéneos (Dependencia)			
		103 kPa	89 kPa	35 kPa	15 kPa
presión	Influye sig. <0,01	103 kPa	89 kPa	35 kPa	15 kPa
Cantidad antiespumante	Influye sig. <0,01	0 y 25 µL		2000 µL	
Presión - antiespumante	Influye sig. <0,01				

Para una mejor observación de esta diferencia del valor de pH en la Figura 15 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 aun cuando los valores pH para los tratamientos a presión atmosférica y al vacío son similares existe una tendencia lineal del pH a incrementarse medida que se utiliza una mayor cantidad de antiespumante, en cada uno de los cuatro grupos de presión con valores de  $R^2$  entre 0,9473 y 0,9999. Tendencia que se mantiene al extrapolar las curvas hasta los valores de pH del jugo clarificado sin floculante ni coadyuvante.

**Figura 15. Efecto de la presión y cantidad de antiespumante sobre el potencial de hidrógeno de la miel de 70 °Brix.**



Adicionalmente este incremento es mayor a medida que se eleva la presión. De esta forma en los tratamientos a presiones atmosféricas y al vacío el incremento en el valor del pH cuando se adiciona un exceso de antiespumante es de aproximadamente 0,1 unidad y el incremento en los sistemas presurizados es de hasta de 0,2 unidades.

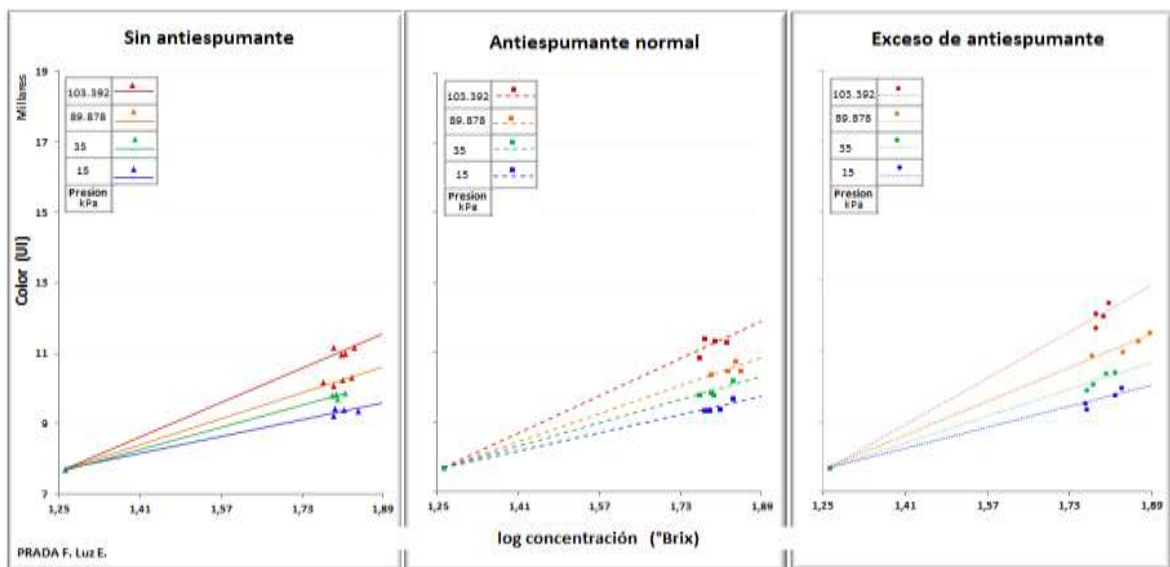
Varios fenómenos pueden dar una explicación a este comportamiento. En primer lugar está el hecho de que las reacciones de hidrólisis y PNE crean un sistema autocatalítico que disminuye el pH [15]. En segundo lugar se debe tomar en consideración las reacciones de reducción del ácido palmítico las cuales compiten por los grupos amino [29]. Finalmente el efecto piezoeléctrico del agua el cual al aumentar la presión del sistema, polariza y contrae el tamaño de la molécula, lo que conlleva a un aumento de la acidez y una disminución del pH [20].

#### **4.3 EFECTO DE LA PRESIÓN DE EVAPORACIÓN Y LA CANTIDAD DE ANTIESPUMANTE SOBRE EL COLOR Y SABOR**

En la Figura 16 se grafican las curvas de color expresado en unidades ICUMSA, contra el grado de evaporación medido en grados Brix; para los 12 tratamientos

estudiados. Estas curvas de color, presentan una tendencia a aumentar el color a medida que aumenta el logaritmo de la concentración del jugo para producir la miel. Tendencia que se mantiene al extrapolar las curvas hasta los valores de pH del jugo clarificado sin floculante ni coadyuvante, con un coeficiente de ajuste  $R^2$  entre 0,9473 y 0,9999.

**Figura 16. Efecto de la presión de evaporación y cantidad de antiespumante sobre el color de la miel.**



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. El color en todos los tratamientos difiere de forma significativa; comprobando así los resultados del análisis estadístico reportado en el resumen Tabla 13.

**Tabla 13. Resumen del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión de evaporación y cantidad de antiespumante sobre el color 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 μL	25 μL	2000 μL	
Presión-antiespumante	Influye sig. <0,01				

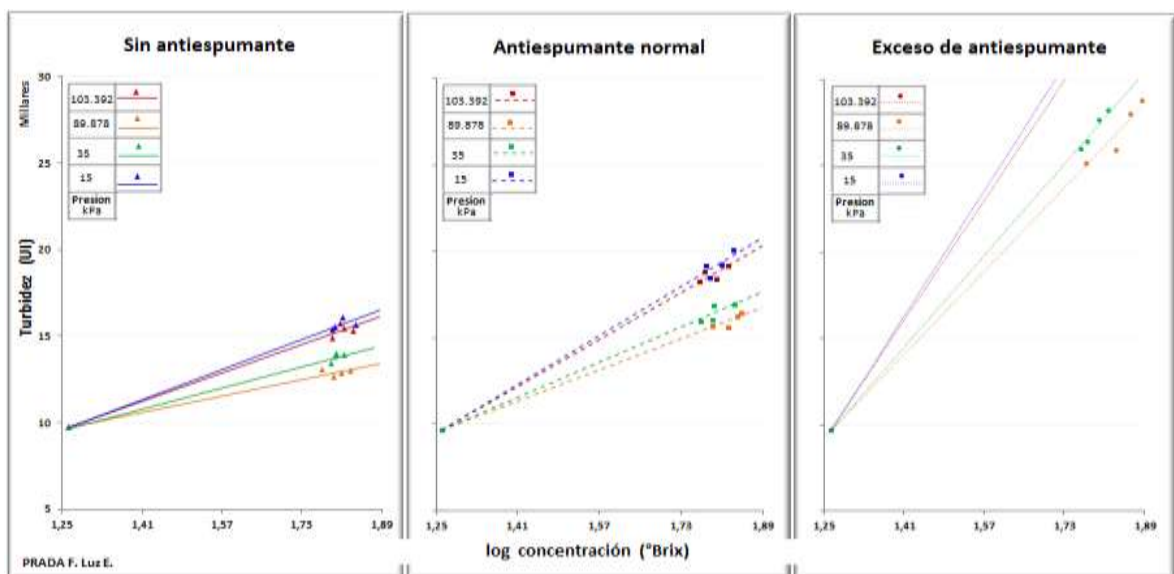
Así mismo el análisis subjetivo del color con la tabla Munsell mostró, que las mieles de los tratamientos en los cuales se utilizó antiespumante presentan el mismo tono e intensidad pero disminuye el valor de la saturación del color.

De forma que la presión y el exceso de antiespumante, oscurece la miel y la panela, aportándole características organolépticas no aceptables para su comercialización como son una sensación y sabor grasoso en la boca. Características causadas posiblemente por el hecho de que el antiespumante es un tensoactivo, insoluble en solventes polares o acuosos, que es menos denso que la miel, por lo que forma una fina capa de aceite sobre la superficie de la miel y la panela la cual se percibe cuando se adiciona en exceso.

#### 4.4 EFECTO DE LA PRESIÓN DE EVAPORACIÓN Y EL ANTIESPUMANTE SOBRE LA TURBIDEZ, LOS SÓLIDOS INSOLUBLES Y EL BRILLO.

La Figura 17, se graficó la turbidez contra el logaritmo de la concentración de la miel, para las cuatro presiones para las tres concentraciones de antiespumante estudiadas.

**Figura 17. Efecto de la presión evaporación y la cantidad de antiespumante, sobre la turbidez de la miel y panela**



En la Figura 17 la turbidez muestra una tendencia a aumentar al incrementarse el logaritmo de la concentración del jugo y la concentración del antiespumante con un valor de  $R^2$  entre 0,8306 y 0,9867. Tendencia que se mantiene al extrapolar las curvas hasta los valores de pH del jugo clarificado sin floculante ni coadyuvante. Además para un mismo valor de la presión el incremento en la cantidad de antiespumante agregado al jugo, genera un incremento significativo en la turbidez de la miel lo que es malo para la calidad de la panela

También se observa que para cada presión las curvas forman dos grupos, el primero conformado por curvas de las mieles obtenidas en los sistemas al vacío de 15 kPa y presurizado y el grupo segundo conformado por las mieles producidas a presión atmosférica y a presiones de vacío de 35 kPa, grupo que presenta los menores valores de turbidez respectivamente. Este comportamiento coincide con los resultados del análisis estadístico cuyo resumen se presenta en la Tabla 14.

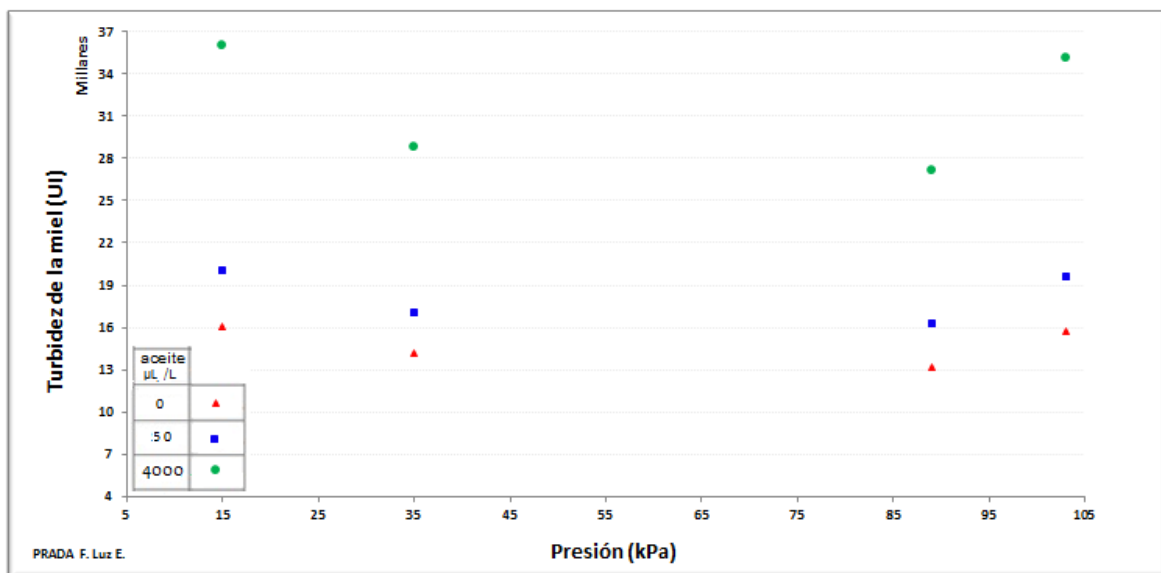
**Tabla 14. Resultados del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión y cantidad de antiespumante sobre la turbidez de la miel**

Variable de estudio	influencia significancia Subconjuntos homogéneos (Dependencia)			
presión	Influye sig. <0,01	15 kPa	35 y 89 kPa	103 kPa
Cantidad antiespumante	Influye sig. <0,01	0	25 $\mu$ L	2000 $\mu$ L
Presión - antiespumante	Influye sig. <0,01			

Una mejor visualización de este comportamiento se aprecia en la Figura 18 donde se graficó la turbidez contra la presión, para cada una de las cantidades de antiespumante experimentadas y a concentraciones de miel de 70 °Brix.

Estas curvas muestran los resultados anteriores y además una posible tendencia polinómica de segundo grado con valores de  $R^2$  entre 0,8712 y 0,8814, la cual requiere para su comprobación una mayor experimentación en valores cercanos a la presión atmosférica. Por otra parte la turbidez de mieles y panelas presenta una relación directa con brillo e inversa con el contenido de sólidos insolubles.

**Figura 18. Efecto de la presión evaporación y la cantidad de antiespumante, sobre la turbidez de la miel y panela**



Una explicación a este comportamiento se encuentra, en el hecho de que la coagulación del material iónico y coloidal no removido durante la clarificación, continúa durante la evaporación debido a la temperatura y al movimiento de las partículas, pero a altas temperaturas algunos de los complejos iónicos-micelares formados se destruyen debido a que absorbe un exceso de agua y se revientan, por lo que en vez de que se formen los sólidos insolubles fáciles de remover, se produce nuevas partículas coloidales y por consiguiente se aumenta la turbidez [19] y se disminuye el brillo de la miel y la panela.

Adicionalmente este efecto se ve incrementado, debido a que el antiespumante es una sustancia apolar, la miel una sustancia polar y los complejos iónicos-micelares formados presenta un grupo apolar y otro polar; estas características permite la formación de capas, donde los complejos iónicos-micelares quedan atrapadas entre la miel y el aceite en un estilo sándwich.

Vale la pena resaltar que después del enfriamiento y sedimentación de las mieles, los tratamientos con antiespumante presentaron la mayor cantidad de

precipitado oscuro y una nata aceitosa que sobrenada en la superficie de la miel, en la cual se encuentra atrapados sedimentos de color oscuro. Esto se debe al hecho de que el antiespumante no es miscible en la miel y es menos denso que ella. Además debido a la polaridad las partículas iónico-micelares, estas quedan atrapadas entre la miel y la capa sobrenadante de aceite [29].

## 5 EFECTO DE LA PRESIÓN DE EVAPORACIÓN Y USO DEL FLOCULANTE Y EL COADYUVANTE DE LA CLARIFICACIÓN SOBRE LA CALIDAD DE LA PANELA

En el proceso panelero, el uso del floculante y coadyuvante durante la clarificación del jugo de caña, es de gran importancia para eliminar el material no deseado que afectan la calidad de la panela en aspectos como el contenido de sólidos insolubles, la turbidez y el color. Motivo por el que uno de los objetivos de este trabajo, fue evaluar a partir de datos experimentales de laboratorio la influencia del uso del balso (floculante) y la cal (coadyuvante), sobre los parámetros de calidad de la panela, cuando se produce en sistemas de evaporación diferentes al atmosférico.

### 5.1 EFECTO DE LA PRESIÓN DE EVAPORACIÓN Y USO DEL FLOCULANTE Y DEL COADYUVANTE SOBRE LOS SÓLIDOS SOLUBLES.

En la Tabla 15 muestra el resumen de los resultados del análisis estadístico de esta parte de la experimentación. En ella se aprecia que el uso o no del coadyuvante forma un solo subconjunto, por lo que se puede inferir el uso de la cal no modifica significativamente la inversión de la sacarosa.

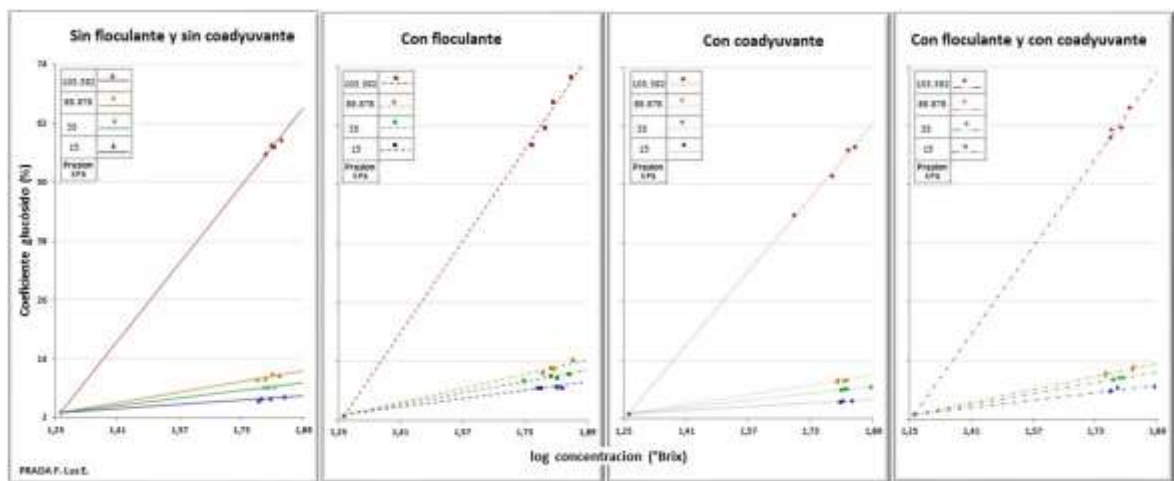
**Tabla 15. Resumen del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión de evaporación y uso del floculante y coadyuvante sobre el coeficiente glucósido de la miel**

Variable de estudio	influencia significancia	Subconjuntos homogéneos (Dependencia)		
presión	Influye sig. <0,01	15 kPa	35 y 89 kPa	103
floculante	Influye sig. <0,01	S	N	
coadyuvante	No influye	S y N		
combinaciones	No influyen			

En la Figura 19, se graficaron las curvas del 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 balso (floculante) y la cal (coadyuvante) durante la clarificación del jugo. En ella se aprecia que en todos los tratamientos el coeficiente glucósido presenta una tendencia a aumentar a medida que aumenta 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 antiespumante.

**Figura 19. Efecto de la presión de evaporación y uso del floculante y coadyuvante, sobre el índice de glucósido de la miel y la panela.**



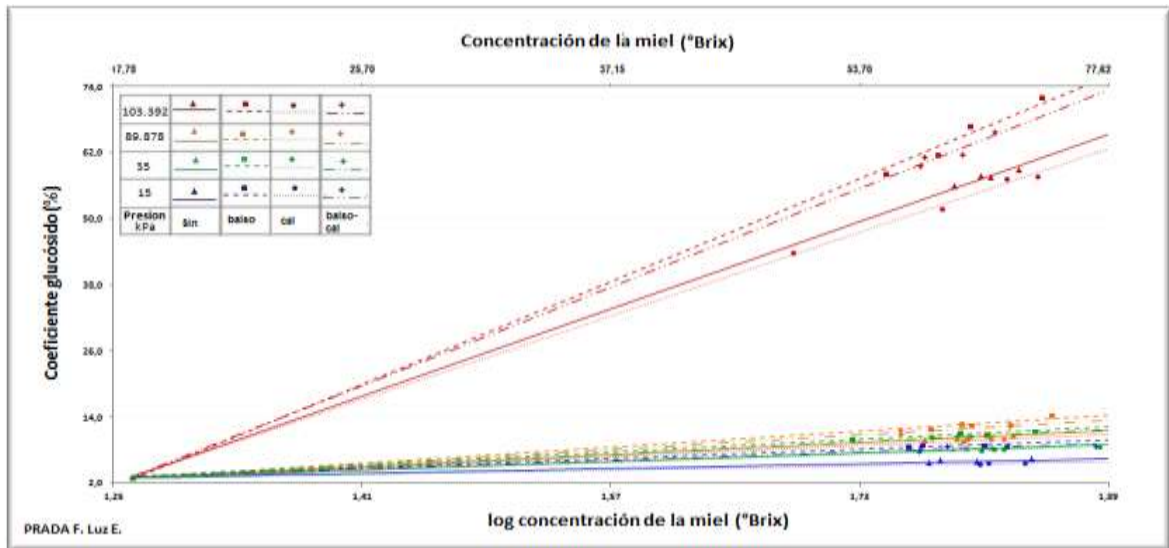
En la Figura 19 también se observa para cada una de las presiones dos subconjuntos formados por las muestras en las que se adiciono o no el floculante. Así las muestras a las que se les adiciono el floculante presentaron un aumento significativo estadísticamente del coeficiente glucósido en comparación con las muestras a las que no se les adiciono. Esta diferencia no solo es ocasionada por la inversión de la sacarosa, sino por el aporte de azúcares reductores realizado por el floculante [25].

De igual forma se puede apreciar que aun cuando los valores del coeficiente glucósido en las muestras a las que se les adiciono el coadyuvante son menores a los valores en los cuales no se adiciono el coadyuvante, estas diferencias no son significativas como lo muestra el análisis estadístico. Esta inversión de la sacarosa ocurre debido a que el proceso panelero durante la

evaporación trabaja con temperaturas cercanas a las de ebullición del agua y pH cercanos al punto isoeléctrico del jugo de caña (alrededor de 5,7), valores que al ser levemente ácidos favorecen una suave inversión de la sacarosa, pues esta requiere un medio básico con pH superiores a 7 para que la inversión sea mínima.

En la Figura 20 se superpusieron las curvas de la Figura 19, de esta forma se aprecia con mayor claridad, las diferencias que presentan los valores de coeficiente glucósido de las muestras del sistema presurizado con respecto a las muestras de los tratamientos a presiones atmosférica y al vacío de 35 kPa, así como las diferencias de estos últimos con los valores de los tratamientos al vacío de 15 kPa.

**Figura 20. Efecto de la presión de evaporación y uso del floculante y coadyuvante, sobre el índice de glucósido de la miel y la panela**



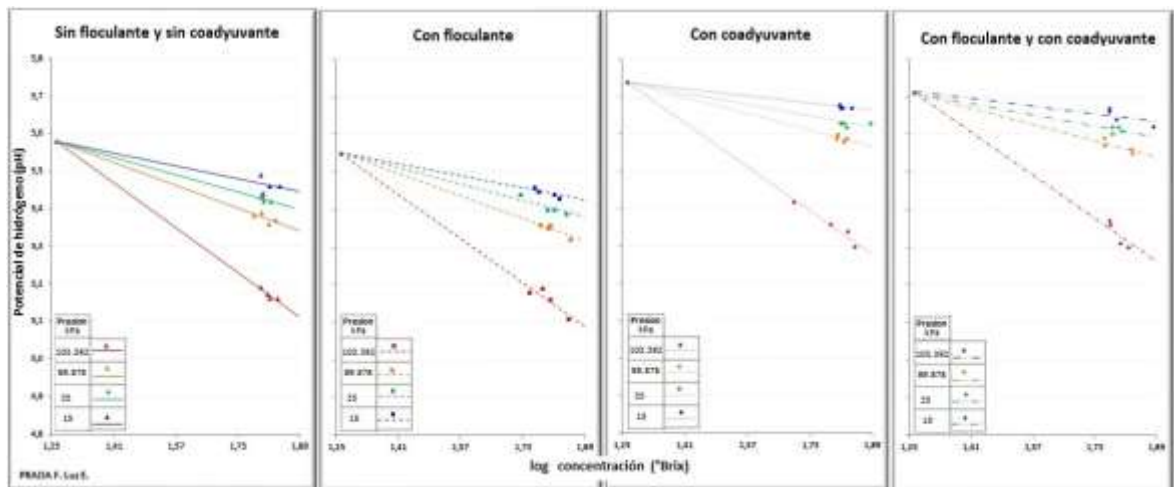
El alto contenido de azúcares invertidos que poseen las mieles producidas en sistemas de evaporación presurizados, les aportan grandes diferencias en sus características fisicoquímicas, destacándose el hecho de que sus panelas no logran la solidificación, aun en los tratamientos en los cuales se adicionó cal. Así mismo las mieles de todos los tratamientos a presiones atmosféricas y al vacío solidificaron y presentaron una dureza apropiada, destacando que los

tratamientos al vacío de 15 kPa, presentaron los menores valores de coeficiente glucósido, la menor inversión y mayor dureza.

## 5.2 EFECTO DE LA PRESIÓN DE EVAPORACIÓN Y USO DEL FLOCULANTE Y DEL COADYUVANTE DE LA CLARIFICACIÓN SOBRE EL PH

En la Figura 21 se grafican 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 el coadyuvante. En ella se aprecia que para 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 para cada tratamiento.

**Figura 21. Efecto de la presión de evaporación y uso del floculante y coadyuvante, sobre el pH de la miel y la panela.**



Adicionalmente en la Figura 21 se aprecia que para cada una de las presiones el uso de la cal presenta dos subconjuntos con diferencias estadísticamente significativas y un incremento de valor del pH, Así, debido a que el coadyuvante es una base, las muestras a las que se les adiciono presentaron un aumento del coeficiente glucósido en comparación con las muestras a las

que no se les adiciono y esto lógicamente ocurrió tanto en el jugo como en la miel. Sin embargo la disminución del pH para todas las presiones, es similar en los tratamientos en los que se adiciono o no la cal (entre 0,4 y 0,5); debido a que aun cuando se modificó el pH los valores a los cuales se realizó esta modificación fueron cercanos al punto isoeléctrico y a estos valores la reacciones de inversión de la sacarosa y de PNE no se ven afectadas significativamente.

Contrariamente el uso del balso disminuye levemente el pH del jugo y la miel, pero la explicación a este comportamiento no se encuentra en el pH de disolución del floculante (6,0 - 6,36) la cual es ligeramente superior a la del jugo clarificado sin balso-cal, sino al aporte de azúcares reductores que realiza la disolución de floculante [25]. Así al aumentar la concentración de reductores en el jugo y debido al calentamiento durante la clarificación, las reacciones de hidrolisis y PNE, se ven favorecidas y consecuentemente aumentan la concentración de iones de hidrógeno, los que a su vez auto-catalizan las reacciones de hidrólisis y de PNE. Este mismo fenómeno explica las diferencias en los valores de pH que presentan las mieles de los sistemas presurizados.

De esta forma los menores valores de pH se presentaron en los sistemas presurizados y clarificados con floculante y los mayores valores en los tratamientos al vacío de 15 kPa cuando solo se modificó el pH. Comprobando los resultados del análisis estadístico cuyo resumen se reporta en Tabla 16.

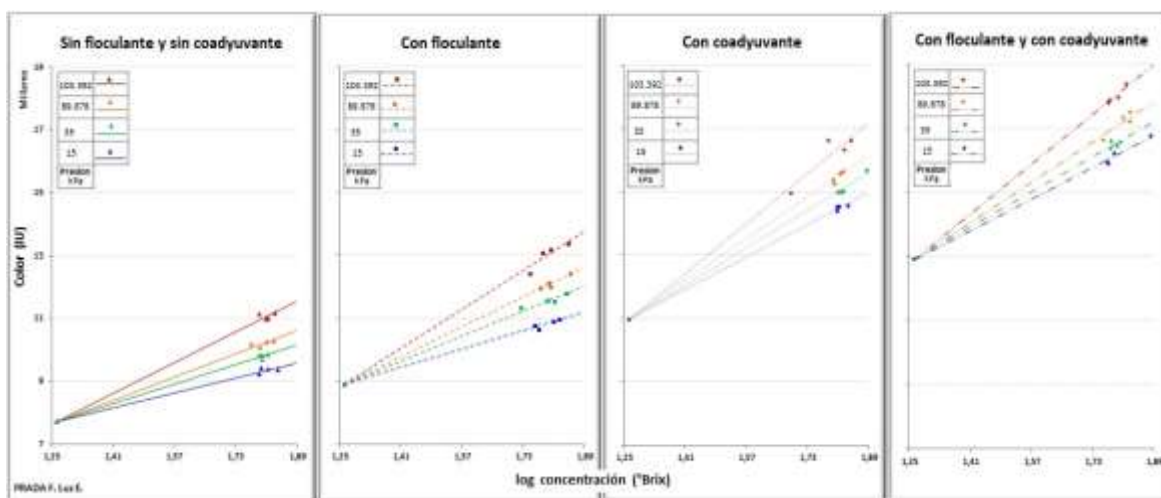
**Tabla 16. Resumen del análisis estadístico del efecto de la presión de evaporación y el uso del floculante y coadyuvante sobre el potencial de hidrógeno de la miel**

<b>Variable de estudio</b>	<b>influencia</b>	<b>significancia Subconjuntos homogéneos (Dependencia)</b>			
presión	Influye sig. <0,01	15 kPa	35kPa	89 kPa	103kPa
floculante	Influye sig. <0,01		S		N
coadyuvante	Influye sig. <0,01		S		N
combinaciones	No influyen				

### 5.3 EFECTO DE LA PRESIÓN Y EL USO DEL FLOCULANTE Y DEL COADYUVANTE SOBRE EL COLOR

En la Figura 22, se graficaron las curvas de color expresado en unidades ICUMSA, contra el grado de evaporación medido como el logaritmo de la concentración de sólidos solubles en grados Brix; para los diez y seis tratamientos de la experimentación. En ella se aprecia que el color presentó una tendencia a disminuir respecto al logaritmo de la concentración, de miel con valores de  $R^2$  entre 0,9624 y 0,9980. Tendencia que se mantiene al extrapolar las curvas hasta los valores de color del jugo clarificado en cada uno de los tratamientos.

**Figura 22. Efecto de la presión y uso del coadyuvante y floculante, sobre el color de la miel y la panela.**



Se debe notar que el cambio en el color se inicia desde el mismo momento en que se agrega el floculante y el coadyuvante al jugo; esto es claro de observar, 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 menores valores de color se presentan en los tratamientos, sin balso-cal, este grupo es seguido en su orden por los grupos de los tratamientos con balso, con cal y los tratamientos de mayor valor, es decir los más oscuros fueron los tratamientos con 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. Estos resultados se pueden comprobar en el resumen del análisis estadístico reportado en la Tabla 17, donde se reporta el resumen del análisis estadístico.

**Tabla 17. Resumen del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión y uso del floculante y coadyuvante sobre el color de la miel**

<b>Variable de estudio</b>	<b>influencia significancia</b>	<b>Subconjuntos homogéneos (Dependencia)</b>			
presión	Influye sig. <0,01	15 kPa	35 kPa	89 kPa	103 kPa
floculante	Influye sig. <0,01	S		N	
coadyuvante	Influye sig. <0,01	S		N	
combinaciones	No influyen				

Adicionalmente, se observó la correlación entre el pH y el color reportada por la literatura [23], ya que las muestras de menor pH por ende 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 [7].

Adicionalmente el pH también afecta la estructura y estabilidad de las antocianinas en la siguiente forma: 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 forma quinoidales de coloraciones purpuras [38]. Contrariamente a lo que podría esperarse, en los tratamientos a la misma presión el color de las mieles clarificadas con balso presentan un aumento, debido al aumento de las sustancias coloreadas, productos de las reacciones de hidrólisis y PNE las cuales se ven favorecidas por el aporte de azúcares reductores del floculante y también por el aporte de

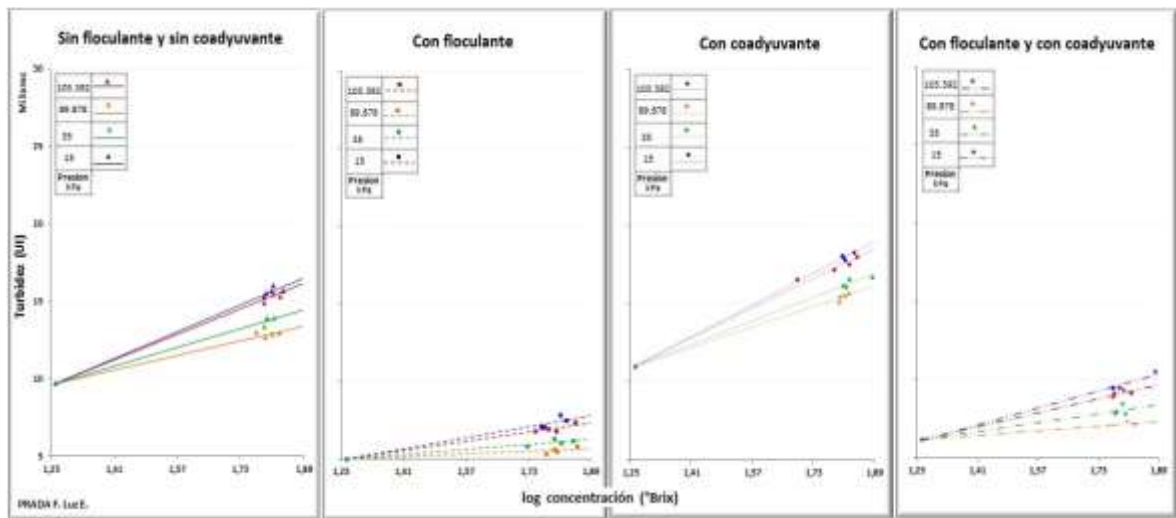
compuestos fenólicos y de hierro [25], los cuales forman durante el calentamiento complejos iónicos-micelares altamente coloreados.

Por otra parte el análisis del color con la tabla Munsell mostro que los tratamientos con cal y con balso-cal presentaron una disminución del brillo y la saturación comparados con los tratamientos sin balso-cal y con balso respectivamente. Los tratamientos con balso y con balso-cal comparados con los tratamientos sin balso-cal y con cal respectivamente presentaron un incremento en el tono.

#### 5.4 EFECTO DE LA PRESIÓN DE EVAPORACIÓN Y USO DEL FLOCULANTE Y COADYUVANTE SOBRE LA TURBIDEZ DE LA MIEL Y PANELA

En la Figura 23 se grafican las curvas de turbidez expresado en unidades ICUMSA contra el logaritmo de la concentración de sólidos solubles de la miel para los 16 tratamientos. En ella se observa que para todos los tratamientos, la turbidez aumenta a medida que aumenta la concentración de la miel, con un valor del coeficiente de ajuste  $R^2$  entre 0,9796 y 0,9014.

**Figura 23. Efecto de la presión de evaporación y uso del coadyuvante y floculante, sobre la turbidez de la miel y la panela**



La turbidez del jugo disminuye al utilizar el balso y aumenta al modificar el pH con la cal. Además se observa que la menor turbidez se logra a presiones cercanas a la atmosférica y los mayores valores de turbidez se presentan a 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.

En cada uno de estos grupos se observa que los mayores valores de turbidez se encontraron en los tratamientos al vacío de 15 kPa y presurizados respectivamente. Estos 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 micelas formadas se re-disuelven y otros se hinchan hasta reventar. De esta forma los menores valores de turbidez se encuentran en los tratamientos a presiones atmosféricas y al vacío de 35 kPa respectivamente.

Este comportamiento comprueba los resultados del análisis estadístico cuyo resumen se presenta en la Tabla 18 donde se resumen los resultados del análisis estadístico para determinar la influencia de la presión y el uso del floculante y el coadyuvante sobre la turbidez de la miel.

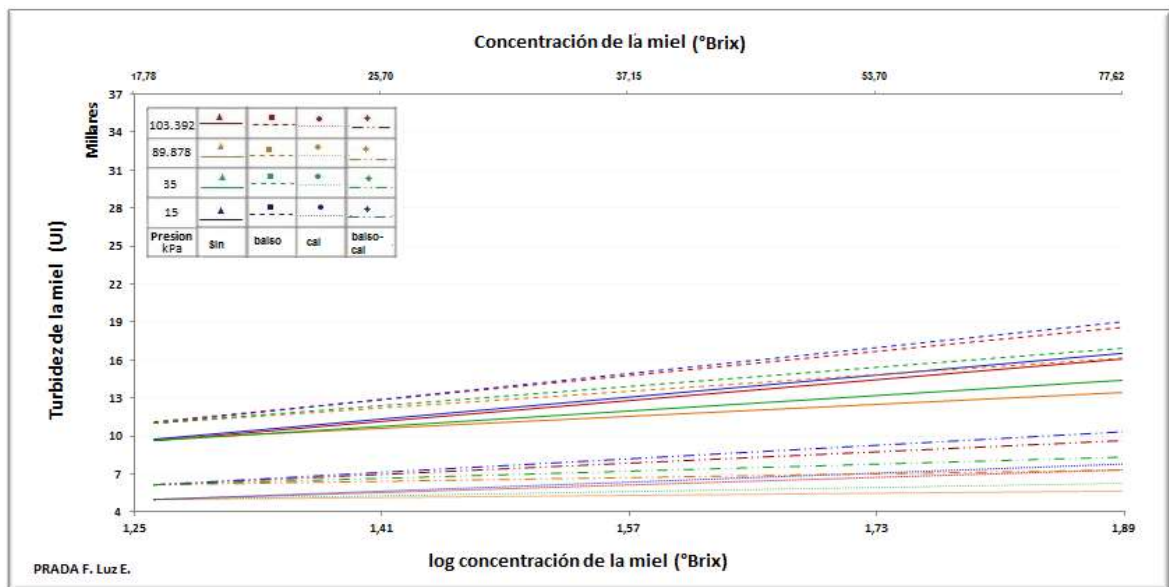
**Tabla 18. Resultados del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión y uso del floculante y coadyuvante sobre el potencial de hidrógeno de la miel**

<b>Variable de estudio</b>	<b>influencia significancia</b>	<b>Subconjuntos homogéneos (Dependencia)</b>			
presión	Influye sig. <0,01	15 kPa	35 kPa	89 kPa	103 kPa
floculante	Influye sig. <0,01		S		N
coadyuvante	Influye sig. <0,01		S		N
combinaciones	No influyen				

Adicionalmente se puede apreciar en la Figura 24 donde se superponen las curvas de la Figura 23, se aprecian dos grupos de curvas uno conformado por los tratamientos sin balso-cal y con cal, y el otro conformado por los

tratamientos con balso-cal y con balso. Siendo este último el grupo de menor valor de turbidez ya que en estos tratamientos se usó el floculante durante la clarificación. En este grupo también se observa que los tratamientos donde se utilizó el balso-cal presento un valor mayor de turbidez.

**Figura 24. Efecto de la presión de evaporación y uso del coadyuvante y floculante, sobre la turbidez de la miel curvas superpuestas**



La turbidez que presentan los tratamientos con cal y con balso-cal, se debe a que al alcalinizarse el jugo en caliente, el primer efecto debido al calor, es la desnaturalización de las proteínas [23] y la coagulación de los coloides. Sin embargo como el pH alcanzado, es el punto isoeléctrico de la mayoría de las proteínas contenidas en el jugo (pH entre 4,5 y 6,0), no se alcanza su desnaturalización completa, por lo que durante la evaporación continua el proceso de coagulación. Pero estos coágulos parecen estar desprovistos de la fuerza mecánica suficiente para soportar su remoción por métodos físicos y después de la adición de cal se precipita el fosfato de calcio, pero no se absorbe ni ocluyen todos los fragmentos, resultando una solución ligeramente más turbia que además incrementa el sarro del recipiente de evaporación. Por otra parte la disolución de balso flocula la mayoría de las partículas coloidales, facilitando su remoción por métodos físicos.

Así, cuando se sedimentan las mieles de los diferentes tratamientos se observa que en aquellos donde no se adiciono balso y cal, la mayor parte de las partículas floculan y sólo una pequeña cantidad de estos sedimentos presentan una coloración negruzca. De otro lado en los tratamientos con balso se presenta sólo una pequeña cantidad de precipitado color blanco y en los tratamientos con cal se presenta una gran cantidad de precipitado negruzco. Finalmente 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.

## **6 EFECTO DE LA PRESIÓN DE EVAPORACIÓN Y LA VARIEDAD DE CAÑA SOBRE LA CALIDAD DE LA MIEL Y LA PANELA**

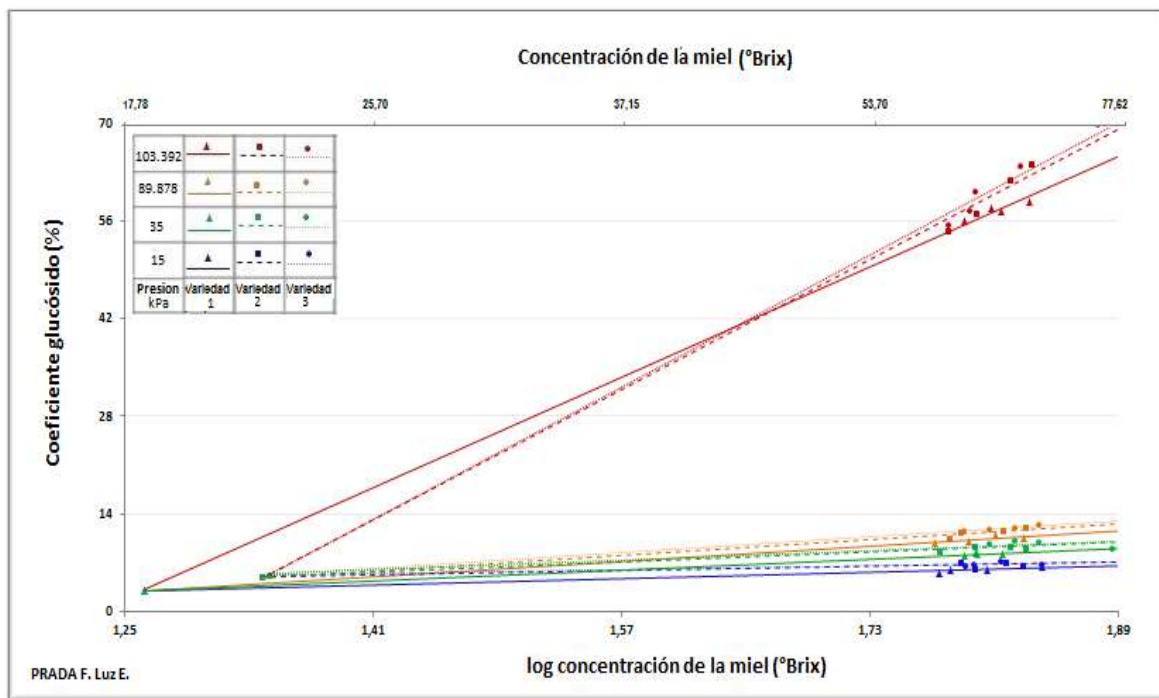
En el jugo de la caña se encuentran disperso además de la sacarosa y los azúcares reductores, múltiples sustancias cuya composición difiere con cada variedad de caña. Por lo tanto, el estudio del efecto de la variedad de la caña cobra gran importancia ya que durante la evaporación además de la eliminación del agua ocurren complejas reacciones de hidrólisis y PNE; razón por la cual el objetivo de este capítulo fue determinar el efecto de la variedad de la caña sobre la calidad de la panela, cuando se evapora en sistemas de presión diferentes a la atmosférica.

### **6.1 EFECTO DE LA PRESIÓN EVAPORACIÓN Y LA VARIEDAD DE CAÑA SOBRE LOS SÓLIDOS SOLUBLES Y EL SABOR.**

La Figura 25, muestra para las cuatro presiones y las tres variedades de caña estudiadas, las curvas de coeficiente glucósido contra el logaritmo de la concentración de los sólidos solubles de la miel medidos en °Brix. Las curvas proyectadas desde los valores de coeficiente glucósido y concentración de sólidos soluble del jugo respectivo, presentaron valores de  $R^2$  entre 0,8797 y 0,9998. Estos valores de  $R^2$  permiten inferir que este es el posible comportamiento del coeficiente glucósido del jugo de caña para convertirse en miel, sin embargo se deben comprobar los valores del coeficiente glucósido para la concentración de la miel entre los 25 y 55 °Brix.

El coeficiente glucósido, presenta un comportamiento directamente proporcional al logaritmo de la concentración de la miel y a la presión del sistema, comprobando los resultados de las pruebas estadísticas de efectos inter-sujetos, las cuales reportan que sobre el coeficiente glucósido la variedad de caña no influye significativamente, pero si influyen la presión con una significancia menor a 0,01 y la concentración de la miel con una significancia menor a 0,05.

**Figura 25. Efecto de la Presión de evaporación y la variedad de caña sobre el coeficiente glucósido de la miel.**



El análisis estadístico también muestra, que los valores del coeficiente glucósido forman dos subconjuntos con las presiones estudiadas y para cada una de estas presiones la variedad forma dos subconjuntos como se aprecia en la Figura 25 y en el resumen de la Tabla 19.

**Tabla 19. Resumen del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión de evaporación y la variedad de caña sobre coeficiente glucósido de la miel**

Variable de estudio	influencia significancia Subconjuntos homogéneos (Dependencia)		
presión	Influye sig. <0,01	103 kPa	89, 35 , 15 kPa
Variedad de caña	No influye	Variedades 1,2	Variedades 2,3
Presión-variedad	No influye		

De esta forma las mieles producidas en el sistema presurizado presentan valores de coeficiente glucósido entre 62% y 74%, las mieles del sistema

atmosférico entre 10% y 14% y las mieles de los sistemas al vacío entre 6 % y 10%. Estos datos nos permiten concluir que la presión es uno de los principales factores que favorecen la inversión de la sacarosa, ya que para todas las variedades los valores de coeficiente glucósido alcanzado por las mieles del sistemas presurizados presentan valores que son cinco veces, los alcanzados por las mieles del sistema atmosférico; y los del sistema atmosférico son mayores que los alcanzados por los sistemas al vacío.

La inversión de la sacarosa está directamente relacionada con la solidificación y dureza de la panela; de forma que las mieles del sistema presurizado no solo no cumplieron con la resolución 799 del ministerio de protección social colombiana con respecto al contenido de azúcares reductores y sacarosa, sino que no lograron solidificar.

Así mismo las mieles del sistema al vacío de 15 kPa obtuvieron los menores valores de azúcares reductores y los mayores de sacarosa y sus panelas presentaron la mayor dureza.

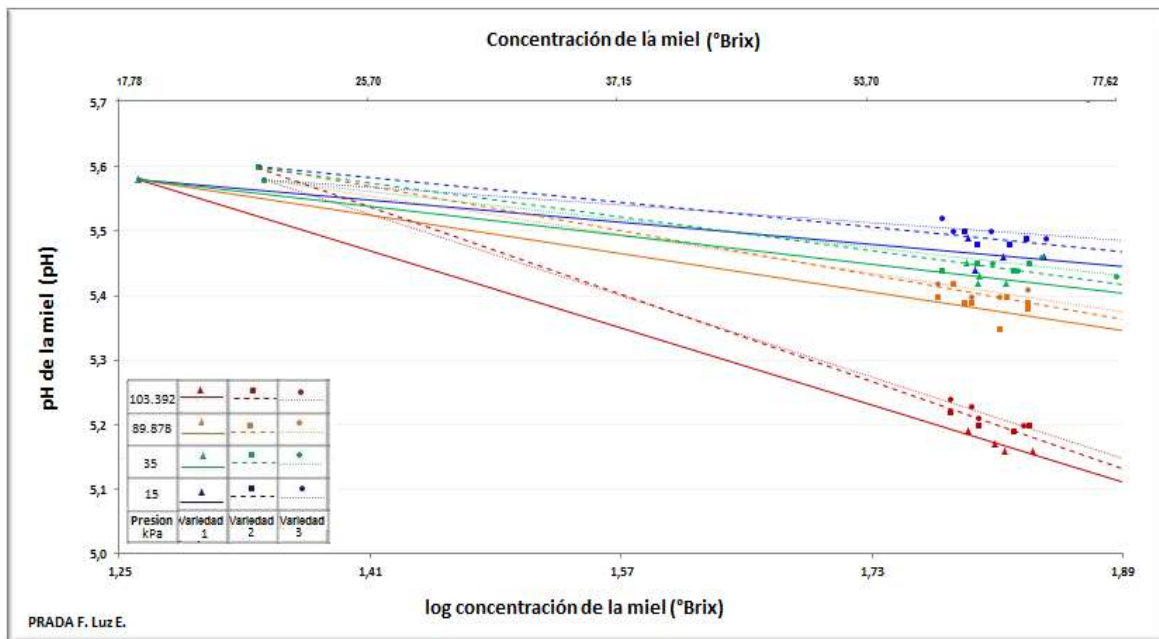
Para todos los sistemas de presión estudiados la variedad 1 presento los menores valores de coeficiente glucósido y la variedad 3 presento los mayores valores; adicionalmente no se observó una correlación entre los coeficientes glucósidos del jugo y el coeficiente glucósido de la miel.

## **6.2 EFECTO DE LA PRESIÓN DE EVAPORACIÓN Y LA VARIEDAD DE CAÑA SOBRE EL PH.**

La Figura 26, se muestran las curvas del potencial de hidrógeno contra el logaritmo de la concentración de sólidos solubles de la miel en grados Brix, para las tres variedades y los cuatro valores de presión estudiadas. Estas curvas presentan una tendencia del potencial de hidrógeno inversamente proporcional al logaritmo de la concentración del jugo y a la presión del sistema, con un valor de  $R^2$  entre 0,9419 y 0,999. Tendencia que es confirmada por los resultados de las pruebas estadísticas de efectos inter-

sujetos, los cuales reportan una influencia con significancia menor a 0,01 de la variedad de caña y la presión sobre el potencial de hidrógeno.

**Figura 26. Efecto de la presión y la variedad de caña sobre el pH de la miel.**



En la Figura 26 también se observan cuatro subconjuntos conformados por cada uno de los sistemas de presión y en cada uno de ellos las variedades forman dos subconjuntos; estas observaciones confirman los resultados del análisis estadístico cuyo resumen se presenta en la Tabla 20.

**Tabla 20. Resumen del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión de evaporación y la variedad de caña sobre potencial de hidrógeno de la miel**

Variable de estudio	Influencia significancia	Subconjuntos homogéneos (Dependencia)			
presión	Influye sig. <0,01	103 kPa	89 kPa	35 kPa	15 kPa
Variedad de caña	Influye sig. <0,01	Variedades 1		Variedades 2,3	
Presión-variedad	No influye				

De esta forma las mieles de las variedades 1 presentan valores de pH mayores de los que presentados por la miel de la variedades 2. Sin embargo no se observó

una correlación entre el pH del jugo y el pH de la miel. Estas variaciones del pH encuentran su explicación en las diferencias composicionales que presenta cada una de las variedades de caña y en el efecto que tiene cada uno de estos elementos en las diferentes reacciones que tienen lugar durante la evaporación.

Así mismo los valores de pH de los tratamientos presurizado y atmosférico presentan diferencias de 0,2 a 0,3 unidades de pH. Diferencias que son cuatro veces, la diferencia existente entre los valores del pH de las mieles del sistema atmosférico y las de vacío de 35 kPa y ocho veces las diferencias, entre los valores de las mieles de los sistemas al vacío de 35 y 15 kPa. Esta significativa reducción del pH de las mieles producidas en sistemas presurizados, al aumentar la presión, posiblemente tiene su explicación en el efecto piezoeléctrico, ya que la presión cambia las dimensiones moleculares, el momento dipolar total y por tanto la tensión eléctrica de salida), la cual produce un aumento de la acidez [20].

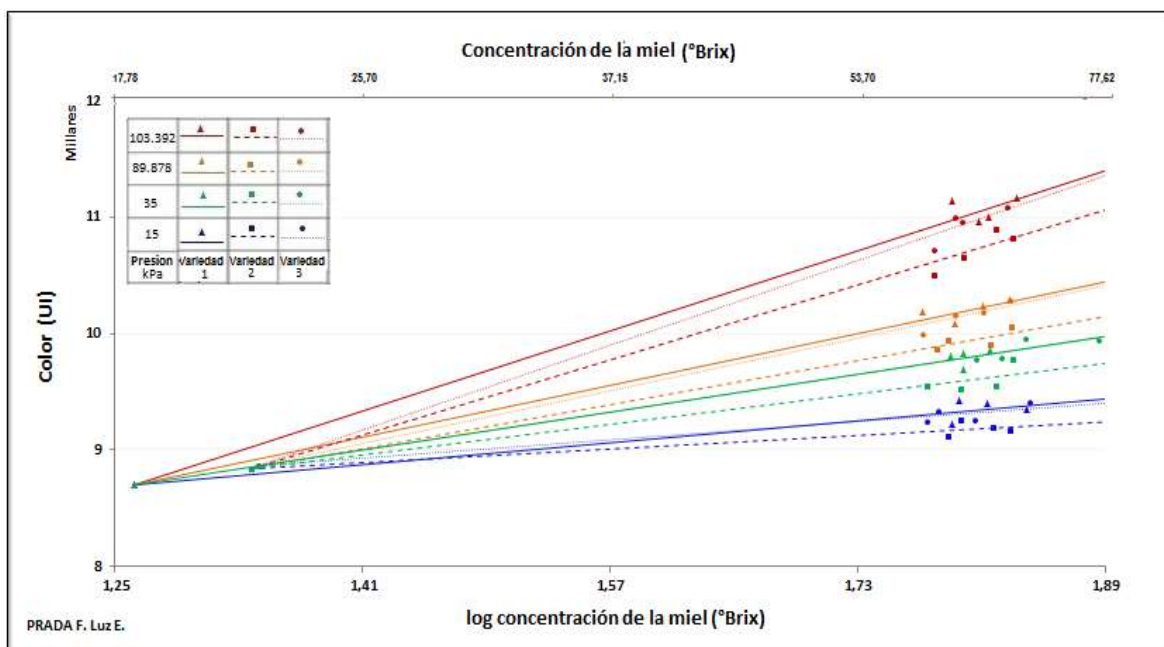
Los resultados estadísticos también correlacionan el pH y el coeficiente glucósido y el glucobrix, por lo que la disminución en el valor del pH durante la evaporación del jugo de caña, posiblemente tiene su origen en la formación de ácidos orgánicos producto de la degradación de los azúcares invertidos, la evaporación de compuestos amoniacales y la transición gradual de fosfato de calcio a fosfato tricálcico [23]. Adicionalmente, el aumento de la concentración de los iones hidrógeno favorece la hidrólisis de la sacarosa y por tanto el aumento de la concentración de los azúcares reductores.

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 auto-cataliza esta reacción [20]. De igual forma, las reacciones de caramelización también son autocatalizadas por el aumento de la acidez

### 6.3 EFECTO DE LA PRESIÓN DE EVAPORACIÓN Y LA VARIEDAD DE CAÑA SOBRE EL COLOR

En la Figura 27 se grafican las curvas de color expresado en unidades ICUMSA, contra el grado de evaporación expresada como logaritmo de la concentración de sólidos solubles, para los cuatro valores de presión y las tres variedades estudiados.

**Figura 27. Efecto de la presión evaporación y la variedad de caña sobre el color de la miel.**



En estas curvas con un valor de ajuste de  $R^2$  entre 0,8633 y 0,9905, se observa que todas las variedades presentan una tendencia a aumentar el color directamente proporcional al logaritmo de la concentración de la miel y la presión del sistema de evaporación la cual se mantiene al ser proyectada desde los valores de color del jugo de la respectiva variedad. Aunque estos valores de  $R^2$  permiten deducir que este sería el más probable comportamiento del jugo de caña durante la evaporación, se deben comprobar los valores de color en las concentraciones de las mieles entre los 25 y 55 °Brix. Adicionalmente no se encontró una correlación entre los colores del jugo y los de la miel.

La Figura 27, también permite apreciar que el color de la miel forma con cada una de las presiones un subconjunto homogéneo y en cada uno de ellos las variedades forma dos subconjuntos. Comportamiento que comprueba los resultados del análisis estadístico, cuyo resumen se reporta en la Tabla 21.

**Tabla 21. Resumen del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión de evaporación y la variedad de caña sobre color de la miel**

<b>Variable de estudio</b>	<b>influencia significancia</b>	<b>Subconjuntos homogéneos (Dependencia)</b>			
presión	Influye sig. <0,01	103 kPa	89 kPa	35 kPa	15 kPa
Variedad de caña	Influye sig. <0,01	Variedades 1		Variedades 2,3	
Presión-variedad	No influye				

De esta forma las mieles del sistema presurizado presentan los colores más oscuros y las del sistema al vacío de 15 kPa los colores más claros. Así mismo el color con la tabla Munsell mostró, que las mieles de las diferentes variedades presentan el mismo tono en combinaciones de rojo y amarillo (atributo que lo distingue de los demás es decir el nombre específico de cada color), pero difiere en el valor (que es la cantidad de luz que emite es decir la cantidad de color blanco o negro que posee en su composición).

Las mieles a presiones diferentes pero de la misma variedad difieren en la saturación (la pureza del color, es decir la combinación con el complementario); de forma que las mieles al vacío presentan coloraciones amarillentas y las del sistema presurizado coloraciones violetas.

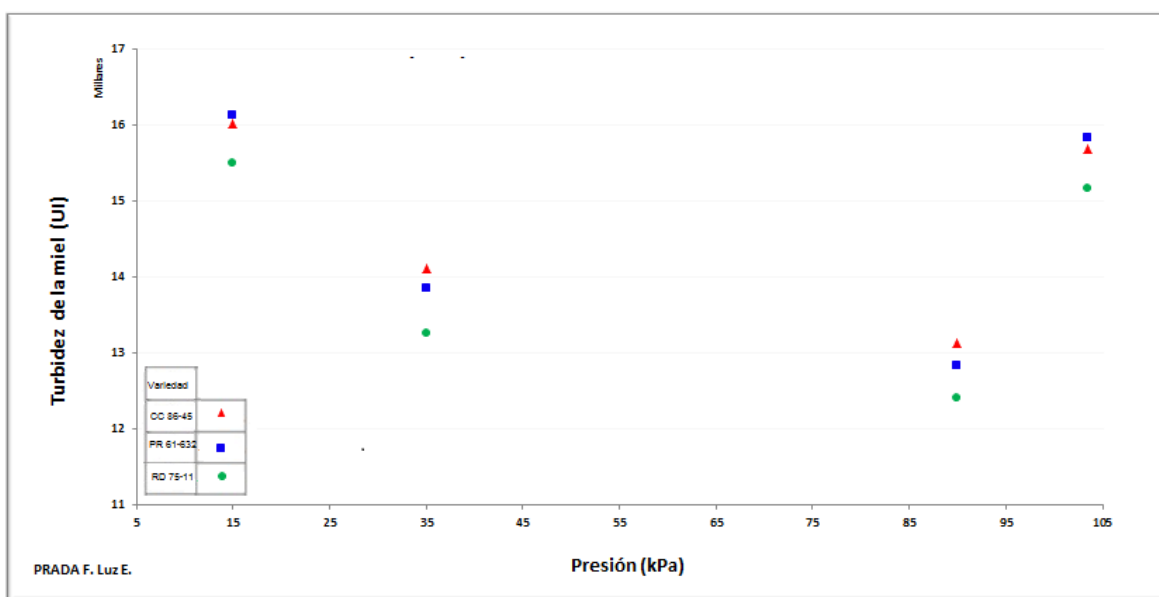
El análisis organoléptico también mostró que las mieles y panelas de los sistemas al vacío presentan bajo sabor a dulce y las del sistema presurizado un fuerte sabor a dulce y olor a caramelo; así mismo entre las variedades se encontró diferencias en el sabor siendo más ácidas las mieles y panelas de la variedad RD 75-11 y menos dulces que las mieles y panelas de las variedades CC 86-45.

#### 6.4 EFECTO DE LA PRESIÓN DE EVAPORACIÓN Y LA VARIEDAD DE CAÑA SOBRE LA TURBIDEZ, SÓLIDOS INSOLUBLES Y BRILLO

El análisis estadístico y gráfico de los datos de la turbidez, presión y concentración de la miel, muestra que la turbidez de las mieles de todas las variedades y presiones estudiadas presenta una tendencia a aumentar a medida que aumenta el logaritmo de la concentración de la miel.

En la Figura 28, se graficó la turbidez de las mieles con una concentración de 70 °Brix, de cada una de las tres variedades en unidades ICUMSA, contra la presión del sistema de evaporación. Estos datos presentan una posible tendencia polinómica en segundo grado, con valores de  $R^2$  entre 0,8814 y 0,9415, la cual requiere para su comprobación de una mayor experimentación en valores de vacío cercanos a la presión atmosférica; donde se aprecian los menores valores de turbidez.

**Figura 28. Efecto de la presión y la variedad de caña sobre la turbidez de la miel.**



En la gráfica también se observa que los valores de turbidez de las mieles de los sistemas presurizado y al vacío de 15 kPa forman un subconjunto y las mieles de

los otros dos sistemas forman otro subconjunto, Además en cada uno de estos subconjuntos las variedades forman dos subconjuntos uno dado por las variedades 1 y 2 y el otro por la variedad 3. Observaciones que confirman los resultados del análisis estadístico cuyo resumen se presenta en la Tabla 22.

**Tabla 22. Resultados del análisis estadístico para determinar el efecto de la presión de evaporación y la variedad de caña sobre color de la miel**

Variable de estudio	influencia	significancia	Subconjuntos homogéneos (Dependencia)		
presión	Influye sig. <0,01		103 y 15 kPa	89 kPa	35 kPa
Variedad de caña	Influye sig. <0,01		Variedades 1,2		Variedades 3
Presión-variedad de caña	No influye				

Para explicar este comportamiento se debe considerar, que el material iónico y coloidal (proteínas, silicatos y fosfatos de calcio, magnesio y hierro) presente en diferentes concentraciones en el jugo de cada variedad, es el causante de la turbidez. Al calentarse el jugo se favorece la coagulación de este material, debido principalmente a la composición del jugo y a la temperatura (por ende a la energía cinética, el movimiento de las partículas y la presión del sistema).

De esta forma, durante la clarificación del jugo, al iniciarse el calentamiento, se inicia la coagulación de algunas partículas coloidales, las cuales forman complejos iónico-micelares que pueden alcanzar el tamaño apropiado para precipitarse o flocular, incrementando el contenido de sólidos insolubles y de partículas que pueden ser removidas por métodos físicos, otras se re-disuelven y algunas no alcanzan el tamaño apropiado para precipitarse o solubilizarse.

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 son bajas y por tanto las mieles de estos sistemas presentan una mayor turbidez que las mieles producidas a presión atmosférica. Pero si bien la temperatura facilita la coagulación también puede contribuir, a la descomposición del complejo iónico-micelar debido a la fuerza

y cantidad de choques entre las partículas, explicando así, la mayor turbidez de los tratamientos presurizados. Adicionalmente, el complejo iónico-micelar durante el calentamiento absorbe agua y se hincha hasta reventar; de forma que el tamaño y estabilidad de la micela formada, depende de la capacidad que tienen las sustancias formadas para absorber el agua [20].

De forma tal que la turbidez presenta una tendencia inversa al contenido de sólidos solubles presentes en la miel y una relación directa con la saturación del color en la tabla Munsell. Adicionalmente el análisis organoléptico también muestra que el brillo y la transparencia de la miel y la panela, presentan una tendencia inversa a la turbidez de la miel.

## 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 presentan 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 de evaporación abierta y 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 en las panelas obtenidas en el sistema presurizado, no cumplen dichos requerimientos respecto a los contenidos de sacarosa y azúcares reductores.

La evaporación del jugo de caña a presiones diferentes a la atmosférica modifica la calidad de la panela de la siguiente forma: al disminuir la presión, se incrementa en la miel y panela, su dureza, opacidad y turbidez; además se disminuye el contenido de sólidos insolubles, el coeficiente glucósido y el color, presentando tendencia hacia los tonos amarillos. De igual forma al aumentar la presión, se incrementa en la miel y la panela el brillo, la turbidez, el coeficiente glucósido y el color predominando las coloraciones oscuras en tonos rojizos; además se disminuye la dureza hasta el punto de no solidificar.

Cuando el flujo calórico suministrando 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.

En todos los sistemas de presión estudiados, el uso de una cantidad de antiespumante normalmente empleada en el trapiche (50  $\mu$ L de antiespumante

por un litro de jugo clarificado), presenta un incremento significativo en la turbidez, de forma que la miel presenta el doble de turbidez que se tiene cuando no se utiliza antiespumante. Además un exceso de antiespumante presenta un incremento significativo del color, los sólidos insolubles y la turbidez, además a la panela le conferirle un sabor desagradable y le deja una capa grasosa sobre la superficie.

Las panelas con o sin antiespumante producidas en todos los sistemas de presión presentan un comportamiento similar. De forma que las altas temperatura del sistema presurizado favorecen las reacciones de hidrolisis y PNE hasta el punto que las mieles y panela producidas en estos sistemas no cumple los requerimientos de la resolución 779 del Ministerio de Protección Social en cuanto a sacarosa y azúcares reductores.

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. Por lo que se recomienda explorar en el prototipo del sistema EME del CIMPA, el uso de sistemas físicos (como es el incremento del número de efectos) para disminuir la cantidad de espuma.

El uso del antiespumante disminuye el volumen de la espuma y utilizando en cantidades de hasta de 50  $\mu\text{L}$  por litro de jugo clarificado no modifica significativamente la calidad de miel o de 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.

Las mieles de los tratamientos del sistema presurizado con todas las combinaciones de las modalidades de uso de floculante natural (balso) y coadyuvante (cal) presentaron: coloraciones oscuras, tonalidades rojizas, alta turbidez, coeficientes glucósidos mayores al 62% y no lograron la solidificación.

Para todas las presiones estudiadas (vacío, atmosférico y a presión), el uso del floculante natural durante la clarificación disminuye significativamente la turbidez y el contenido de sólidos insolubles, incrementa el brillo y le aporta una suave coloración rojiza al jugo, la miel y la panela; cualidades altamente apreciables en miel y panela.

El uso de la coadyuvante mejora la dureza de la panela, pero incrementa la turbidez y el porcentaje de sólidos insolubles, aportándole a la panela un efecto visual de coloraciones más oscuras y opacas, características que son poco atractivas al productor y consumidor y también incrementa la incrustación del equipo.

En los experimentos en los que se utilizó el floculante y el coadyuvante se observó una mayor dificultad para la limpieza de los recipientes, por lo que se recomienda estudiar el efecto de su uso sobre la formación de sarro en el equipo.

Las tres variedades de estudio, en todos los sistemas de presión estudiados presentaron un comportamiento similar, con diferencias estadísticamente no significativas en los valores de las variables, sacarosa, azúcares reductores, coeficiente glucósido, pH y color, pero sí tiene efecto sobre la turbidez, con diferencias de significancia menor de 0,01. De esta forma las diferencias de color que el consumidor percibe entre las panelas provenientes de las diferentes variedades de caña, son acentuadas por la turbidez.

Aun cuando existen diferencias en el color y la turbidez de mieles y panelas producidas con el jugo de diferentes variedades de caña, estas diferencias no son significativas y podrían ser modificadas utilizando un agente floculante y controlando la presión y velocidad de calentamiento.

Todas las panelas producidas experimentalmente, con mieles de sistemas presurizados no solidificaron y presentaron coeficiente glucósido superior a 55% y las panelas de los sistemas de bajo flujo calórico ( $17,857 \text{ kW/m}^2$ ) presentaron baja dureza y coeficientes glucósidos superiores a 14%.

## RECOMENDACIONES.

Cuando se estudia el efecto del sistema de evaporación del jugo de caña sobre la calidad de la panela, se recomienda realizar y analizar el proceso sólo hasta mieles, puesto que las operaciones de concentración, batido y moldeado conllevan una serie de reacciones que alteran los resultados.

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. Por lo que se recomienda explorar en el prototipo del sistema EME del CIMPA, el uso de sistemas físicos para disminuir la cantidad de espuma.

Puesto que durante la evaporación precipitan algunas partículas que no pueden ser removidas durante la clarificación y se forman otras nuevas partículas coloidales, se recomienda determinar el valor nutricional de las partículas y con base a los resultados adecuar el proceso para su remoción o dispersión. Así como el desarrollo de una metodología para la dosificación de las lechadas de cal y floculante.

El uso floculantes naturales como el balso durante la clarificación, forma en el equipo de evaporación una capa polimérica que se puede remover relativamente fácil con detergente y fricción con una superficie suave como una esponja. Por lo que se recomienda que para la construcción del equipo de evaporación múltiple efecto se estudie el empleo de materiales lisos y antiadherentes; así como el uso utensilios de lavado que no lo rallen las superficies, ya que esto aumenta el sarro en el equipo de evaporación.

Al implementar el evaporador múltiple efecto al proceso panelero, se debe emplear un flujo calórico alto (superior a  $23.809 \text{ kW/m}^2$ ), presiones lo más cercanas posibles a la atmosférica (vacío 40 kPa y 92 kPa), sin antiespumante y el jugo de caña debe ser clarificado con floculante y sin cal.



## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1]. RODRÍGUEZ, Gonzalo Y GOTTRET María. Aprendiendo del pasado para proyectarnos hacia el futuro: adopción e impacto de la tecnología de panela en la hoya del río Suarez y Cundinamarca (Colombia). En: Informe técnico Corpoica-E.E. Cimpa y CIAT. Barbosa Santander, 2004. p61.
- [2]. GARCÍA, Hugo; PEÑA, Adriana; LÓPEZ, Ricardo; DURAN, Elizabeth y OLVERA, Gladys. Desarrollo de un sistema de evaporación y concentración de jugo de múltiple efecto para mejorar la eficiencia térmica y la productividad y disminuir el impacto ambiental de la panela. Internet: (<http://201.234.78.28:8080/jspui/bitstream/123456789/1876/1/Microsoft%20Word-MINAGRICULTURA.-proyecto%20Pa.pdf>). Actualizado noviembre de 2010. p13.
- [3]. DURAN Elizabeth. Determinación de la influencia energética de un sistema de evaporación de múltiple efecto empleado en la concentración de jugos de caña panelera. Trabajo de grado, ingeniero químico. Universidad América, Facultad de ingeniería química. Colombia. Bogotá. 2010. p 97.
- [4]. TELLOWS P. Tecnología del Procesado de los Alimentos, Principios y Prácticas. Madrid. 1994. 120 p
- [5]. JAYES, W.E. Optimum distribution of heating surface in a multiple effect evaporator train. En: SASTA 69 congreso anual. Durban, South África. 2005.
- [6]. DURMUS K y IBRAHIM, S. Mathematical modeling of multiple-effect evaporators and energy economy. Science Direct. Vol 27. Enero 2004.
- [7]. HONIG, Peter. Principios de tecnología azucarera. Tomo I, II y III. Propiedades de los azúcares y no azúcares la purificación del jugo. Cuarta impresión. México. 1982. p 645.

- [8]. DURAN, Néstor; GIL, Nicolás y GARCÍA, Hugo. Manual de elaboración de panela y otros derivados de la caña. Convenio de investigación y divulgación para el mejoramiento de la industria panelera ICA-Holanda CIMPA. Colombia, Barbosa Santander. 1992. P 212.
- [9] COMISIÓN DEL CODEX ALIMENTARIUS. Propuestas de elaboración de nuevas normas y textos afines y de interrupción de trabajos Julio 2011. Por la cual se establece la norma técnica para la producción y comercialización de la panela para consumo humano. En: Acta CX/CAC 11/34/9-add.1, Tema 9 del programa. Ginebra. 2011. 16 p
- [10]. PRADA, Luz E; CASTRO, Zamir, GARCÍA, Hugo y ROJAS, Harvey. Hornillas paneleras Ward-Cimpa: validación de los modelos matemáticos de diseño Corpoica-UIS. En: Revista Fuentes, el Reventón energético Julio-diciembre, Vol 10, N° 2. Bucaramanga. 2012. p 61-69.
- [11]. CHEM, James. Manual de Caña. Segunda edición. México. 1991. 1200 p. ISBN 968-183-662-6.
- [12]. HUGOT, E. Manual para ingenieros azucareros. Traducido del original en francés y de la edición inglesa por RUIZ C, Carlos. Sexta impresión. México 1963. p 803.
- [13]. FOUCONNIER B. Descripción del proceso para la elaboración de piloncillo a partir de la caña de azúcar. Internet: (<http://es.scribd.com/doc/86987460.pdf>). Actualizado marzo 28 de 2012. p 23.
- [14]. PONCE E. Carbohidratos y reacciones de los carbohidratos. Internet: (<http://www.docencia.izt.uam.mx/epa/archivos/quimalin/carbohidratos.pdf>). Publicado 23 de junio 2008.
- [15]. FERNÁNDEZ J. Tema 5: Hidratos de Carbono y su aprovechamiento. Ampliación de tecnología de los Alimentos. Internet: (<http://www.ual.es/docencia/jfernand/ATA/Tema5/Tema5-HidratosCarbono.pdf>) Publicado abril 26 del 2005. p 38.

- [16]. GARCÍA B, Deborah. Estudio cinético de la inversión de la sacarosa. Internet: (<http://www.colegioesclavas.org/ArchivosColegios/esclavas/scorazonacoruna/Archivos/Apuntes/Art.%20Inversi%C3%B3n%20de%20la%20sacarosa.pdf>), actualizado abril 2007. p 8.
- [17]. JEREZ, Luis Carlos. Control de inversión de la sacarosa en el proceso de elaboración del jarabe simple de bebidas carbonatadas, Trabajo de grado Ingeniero Químico. Universidad de San Carlos. Facultad de Ingeniería. Guatemala 2008. 58 p.
- [18] ZOSSI, S; CÁRDENAS, G; SOROL, N y SASTRE, M. Influencia de compuestos azúcares y no azúcares en la calidad industrial de caña de azúcar en Tucumán (R. Argentina). En: Revista industrial y agrícola de Tucumán, Junio, vol.87 no.1 Las Talitas. 2010. ISSN 1851-3018.
- [19]. DÍAZ N y CLOTET R. Cinética de la caramelización en soluciones azucaradas simples. En: Revista Alimentaria Enero-febrero, Vol 32, No 259. Barcelona. 1995. p 35-38. ISSN 0300-5755.
- [20]. ZAMORA, M; MOLINA, M y CHACÓN, G. Evaluación efecto de la temperatura, concentración y flujo volumétrico en la hidrólisis de la sacarosa mediante una invertasa inmovilizada en un reactor esférico. En: Ingeniería, Vol. 21, Art.1. San José de Costa Rica. 2011. ISSN 1409-2441
- [21]. ----- . La limpieza de los jugos un requisito indispensable para la calidad de la pana y de las mieles. En Revista Corpoica, Innovación y cambio tecnológico. Fasc 1. Vol 4. p 12-19. Bogotá. 2006. ISSN 1657-0901.
- [22]. RUIZ V, Carlos. 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 alcalinizante, En: informe final de consultoría. Corpoica-CIMPA, Barbosa. 1998. 44 p
- [23]. REIN W, Peter. Ingeniería de la caña de azúcar. Berlín. 2012. 879 p. ISBN 978-87040-142-9.

- [24]. VILLA R, MARÍA. Efecto de microbicidas y antagonistas microbianos sobre los microorganismos causales del deterioro poscosecha de la caña y su impacto en las pérdidas de sacarosa en el ingenio. Tesis Tecnóloga avanzada. Instituto politécnico nacional. Tlaxcala, 2008. 91 p.
- [25]. ACERO V, Osman L y PACHECO R, Guerly H. Elaboración de las fichas técnicas de las disoluciones mucilaginosas de balso, cadillo y guásimo: aglutinantes en el proceso de clarificación del jugo de caña. Trabajo de grado Químico de Alimentos. Tunja. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de Química de Alimentos. Escuela de Química, 2001. 128p.
- [26]. PRADA F, Luz E. Mejoramiento en la calidad de miel y panela. Barbosa Santander. 2002. 24 p.
- [27]. BELANDRIA V. Estabilización de espumas no acuosas en presencia de sólidos finos. Tesis de grado Ingeniera química. Universidad de los Andes. Mérida, 2001. p 87.
- [28]. SALAGER A. ANDEREZ J. Y FORGIARINI A. Influencia de la Formulación sobre las espumas. Traducido del francés publicado en L'Actualité Chimique, abril 1999 por MOLINA María. 14 p. Internet: ([http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S263\\_Espumas.pdf](http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S263_Espumas.pdf)).
- [29]. ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACION Y LA SALUD. Grasas y aceites en la nutrición humana. En: FAO/OMS de expertos. Roma. 1997. p 54.
- [30]. VALENZUELA, A; SANHUEZA, J; NIETO, S; PETERSEN, G y TAVELLA M. Estudio comparativo en fritura de la estabilidad de diferentes aceites vegetales. Monografía. Instituto de Farmacia y Alimentos (IFAL) de la Universidad de La Habana, Ciudad de La Habana. Diciembre 2005. 34 p.
- [31]. COLOMBIA. MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL Resolución 779 (17 de marzo de 2006). Por la cual se establece el reglamento técnico sobre

los requisitos sanitarios que se deben cumplir en la producción y comercialización de la panela para su consumo humano y se dictan otras disposiciones. Bogotá. 2006. 9 p.

[32]. INSUASTY Orlando. Importancia del mejoramiento genético de la caña de azúcar. En: Variedades de Caña de azúcar para la producción de panela. Internet: ([http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home\\_4/mod\\_virtuales/modulo1/index.html](http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_4/mod_virtuales/modulo1/index.html).) Actualizado 31 enero 2012.

[33]. INSUASTY, Orlando; MANRIQUE, Roberto Y PALACIO, Obdulio. Catálogo de variedades de caña para la producción de panela en la HRS. Barbosa. 2003. p56. ISBN 958-8210-10-0

[34]. LARRAHONDO, Jesús. Calidad de la Caña de azúcar En: El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. Cali. 1995. p 337- 354.

[35]. GIL, Nicolás. Efecto de la temperatura sobre el pH del jugo y meladuras. En: Carta Trimestral CENICAÑA 3. Vol2, Cali. 2003. p10-19. ISSN 958-9590438.

[36]. GODSHALL, M A. Collaborative study on starch in raw sugar using the SPRI rapid starch method. En: Proc. SPRI Conference, Atlanta, Georgia, USA, 2004. p 442-448.

[37]. CEVALLOS C, Bolívar A y CISNEROS Z, Luis A. Stability of anthocyanin-based aqueous extract of Andean purple corn and red-fleshed sweet potato compared to synthetic and natural colorants. En: Elsevier Ltda. Food Chemistry 86, 2004, p 69-77.

[38]. DAVIS, S.B. The chemistry of colour removal: a processing perspective. En: Proc S Afr Sug Technol Ass 75. Durban. 2001. p 328-336

[39] GARZÓN, Gloria. 2008. Anthocyanins as natural colorants and bioactive compounds: A Review. Acta Biol. Colomb. 13, No 3, p 27-36. ISSN 0120-548X.

- [39]. INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TÉCNICAS Y CERTIFICACIÓN. Requisitos generales de competencia de laboratorios de ensayo y calibración. Norma técnica colombiana NTC-ISO-IEC 17025 del 18-04-2001. Bogotá, 2002. 37p.
- [40]. GRIFUL P, Eulalia y CANELA C. Miguel. Gestión de la Calidad. Barcelona, 2005. 236p. ISBN 84-8301-791-1.
- [41]. INSTITUTO ALEMÁN DE NORMALIZACIÓN. Prueba de presión apropiada para asegurar uso bajo vacío de artículos Norma DIN12-476 ISO 6556, octubre 1981. P 12
- [42]. WROLSTAD, R; LAURO, G y FRANCIS, F. Anthocyanins. En: Natural Food Colorants. New York. 2000. p 237-252.

## BIBLIOGRAFÍA

ACERO V, Osman L y PACHECO R, Guerly H. Elaboración de las fichas técnicas de las disoluciones mucilaginosas de balso, cadillo y guásimo: aglutinantes en el proceso de clarificación del jugo de caña. Trabajo de grado Químico de Alimentos. Tunja. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Facultad de Química de Alimentos. Escuela de Química, 2001. 128p.

CHEM, James. Manual de Caña. Segunda edición. México. 1991. 1200 p. ISBN 968-183-662-6.

COLOMBIA. MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL Resolución 779 (17 de marzo de 2006). Por la cual se establece el reglamento técnico sobre los requisitos sanitarios que se deben cumplir en la producción y comercialización de la panela para su consumo humano y se dictan otras disposiciones. Bogotá. 2006. 9 p.

CEVALLOS C, Bolívar A y CISNEROS Z, Luis A. Stability of anthocyanin-based aqueous extract of Andean purple corn and red-fleshed sweet potato compared to synthetic and natural colorants. En: Elvseivier Ltda. Food Chemisty 86, 2004, p 69-77.

COMISIÓN DEL CODEX ALIMENTARIUS. Propuestas de elaboración de nuevas normas y textos afines y de interrupción de trabajos Julio 2011. Por la cual se establece la norma técnica para la produccion y comercialización de la panela para consumo humano. En: Acta CX/CAC 11/34/9-add.1, Tema 9 del programa. Ginebra. 2011. 16 p

DAVIS, S.B. The chemistry of colour removal: a processing perspective. En: Proc S Afr Sug Technol Ass 75. Durban. 2001. p 328-336

DÍAZ N y CLOTET R. Cinética de la caramelización en soluciones azucaradas simples. En: Revista Alimentaria Enero-febrero, Vol 32, No 259. Barcelona. 1995. p 35-38. ISSN 0300-5755.

DURAN, Néstor; GIL, Nicolás y GARCÍA, Hugo. Manual de elaboración de panela y otros derivados de la caña. Convenio de investigación y divulgación para el mejoramiento de la industria panelera ICA-Holanda CIMPA. Colombia, Barbosa Santander. 1992. P 212.

DURAN Elizabeth. Determinación de la influencia energética de un sistema de evaporación de múltiple efecto empleado en la concentración de jugos de caña panelera. Trabajo de grado, ingeniero químico. Universidad América, Facultad de ingeniería química. Colombia. Bogotá. 2010. p 97.

DURMUS K y IBRAHIM, S. Mathematical modeling of multiple-effect evaporators and energy economy. Science Direct. Vol 27. Enero 2004.

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA ALIMENTACION Y LA SALUD. Grasas y aceites en la nutrición humana. En: FAO/OMS de expertos. Roma. 1997. p 54.

FERNÁNDEZ J. Tema 5: Hidratos de Carbono y su aprovechamiento. Ampliación de tecnología de los Alimentos. Internet: (<http://www.ual.es/docencia/jfernand/ATA/Tema5/Tema5-HidratosCarbono.pdf>) Publicado abril 26 del 2005. p 38.

FOUCONNIER B. Descripción del proceso para la elaboración de piloncillo a partir de la caña de azúcar. Internet: (<http://es.scribd.com/doc/86987460.pdf>). Actualizado marzo 28 de 2012. p 23.

BELANDRIA V. Estabilización de espumas no acuosas en presencia de sólidos finos. Tesis de grado Ingeniera química. Universidad de los Andes. Mérida, 2001. p 87.

GARCÍA B, Deborah. Estudio cinético de la inversión de la sacarosa. Internet: ( <http://www.colegioesclavas.org/ArchivosColegios/esclavas/scorazonacoruna/Archivos/Apuntes/Art.%20Inversi%C3%B3n%20de%20la%20sacarosa.pdf> ), actualizado: abril 2007. p 8.

GARCÍA, Hugo; PEÑA, Adriana; LÓPEZ, Ricardo; DURAN, Elizabeth y OLVERA, Gladys. Desarrollo de un sistema de evaporación y concentración de jugo de múltiple efecto para mejorar la eficiencia térmica y la productividad y disminuir el impacto ambiental de la panela. Internet: (<http://201.234.78.28:8080/jspui/bitstream/123456789/1876/1/Microsoft%20Word-MINAGRICULTURA.-proyecto%20Pa.pdf>). Actualizado noviembre de 2010. p13.

GARZÓN, Gloria. 2008. Anthocyanins As Natural Colorants And Bioactive Compounds: A Review. Acta Biol.Colomb. 13, No 3, p 27-36. ISSN 0120-548X.

GIL, Nicolás. Efecto de la temperatura sobre el pH del jugo y meladuras. En: Carta Trimestral CENICANA 3. Vol2, Cali. 2003. p10-19. ISSN 958-9590438.

GODSHALL, M A. Collaborative study on starch in raw sugar using the SPRI rapid starch method. En: Proc. SPRI Conference, Atlanta, Georgia, USA, 2004. p 442-448.

GRIFUL P, Eulalia y CANELA C. Miguel. Gestión de la Calidad. Barcelona, 2005. 236p. ISBN 84-8301-791-1.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACIÓN. Requisitos generales de competencia de laboratorios de ensayo y calibración. Norma técnica colombiana NTC-ISO-IEC 17025 del 18-04-2001. Bogotá, 2002. 37p.

INSTITUTO ALEMÁN DE NORMALIZACIÓN. Prueba de presión apropiada para asegurar uso bajo vacío de artículos Norma DIN12-476 ISO 6556, octubre 1981. P 12

INSUASTY Orlando. Importancia del mejoramiento genético de la caña de azúcar. En: Variedades de Caña de azúcar para la producción de panela. Internet: ([http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home\\_4/mod\\_virtuales/modulo1/index.html](http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_4/mod_virtuales/modulo1/index.html).) Actualizado 31 enero 2012.

INSUASTY, Orlando; MANRIQUE, Roberto Y PALACIO, Obdulio. Catálogo de variedades de caña para la producción de panela en la HRS. Barbosa. 2003. p56. ISBN 958-8210-10-0

HUGOT, E. Manual para ingenieros azucareros. Traducido del original en francés y de la edición inglesa por RUIZ C, Carlos. Sexta impresión. México 1963. p 803.

HONIG, Peter. Principios de tecnología azucarera. Tomo I, II y III. Propiedades de los azúcares y no azúcares la purificación del jugo. Cuarta impresión. México. 1982. p 645.

JAYES, W.E. Optimum distribution of heating surface in a multiple effect evaporator train. En: SASTA 69 congreso anual. Durban, South África. 2005.

JEREZ, Luis Carlos. Control de inversión de la sacarosa en el proceso de elaboración del jarabe simple de bebidas carbonatadas, Trabajo de grado Ingeniero Químico. Universidad de San Carlos. Facultad de Ingeniería. Guatemala 2008. 58 p.

LARRAHONDO, Jesús. Calidad de la Caña de azúcar En: El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. Cali. 1995. p 337- 354.

PRADA F, Luz E. Mejoramiento en la calidad de miel y panela. Barbosa Santander. 2002. 24 p.

-----, La limpieza de los jugos un requisito indispensable para la calidad de la panea y de las mieles. En Revista Corpoica, Innovación y cambio tecnológico. Fasc 1. Vol 4. p 12-19. Bogotá. 2006. ISSN 1657-0901.

PRADA, Luz E; CASTRO, Zamir, GARCÍA, Hugo y ROJAS, Harvey. Hornillas paneleras Ward-Cimpa: validación de los modelos matemáticos de diseño Corpoica-UIS. En: Revista Fuentes, el Reventón energético Julio-diciembre, Vol 10, N° 2. Bucaramanga. 2012. p 61-69.

PONCE E. Carbohidratos y reacciones de los carbohidratos. Internet: (<http://www.docencia.izt.uam.mx/epa/archivos/quimalin/carbohidratos.pdf>). Publicado 23 de junio 2008.

REIN W, Peter. Ingeniería de la caña de azúcar. Berlín. 2012. 879 p. ISBN 978-87040-142-9.

RODRÍGUEZ, Gonzalo Y GOTTRET María. 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). En: Informe técnico Corpoica-E.E. Cimpa y CIAT. Barbosa Santander, 2004. p61.

RUIZ V, Carlos. 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 alcalinizante, En: informe final de consultoría. Corpoica-CIMPA, Barbosa. 1998. 44 p

SALAGER A. ANDEREZ J. Y FORGIARINI A. Influencia de la Formulación sobre las espumas. Traducido del francés publicado en L'Actualité Chimique, abril 1999 por MOLINA María. 14 p. Internet: ([http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S263\\_Espumas.pdf](http://www.firp.ula.ve/archivos/cuadernos/S263_Espumas.pdf)).

TELLOWS P. Tecnología del Procesado de los Alimentos, Principios y Prácticas. Madrid. 1994. 120 p

VALENZUELA, A; SANHUEZA, J; NIETO, S; PETERSEN, G y TAVELLA M. Estudio comparativo en fritura de la estabilidad de diferentes aceites vegetales. Monografía. Instituto de Farmacia y Alimentos (IFAL) de la Universidad de La Habana, Ciudad de La Habana. Diciembre 2005. 34 p.

VILLA R, MARÍA. Efecto de microbicidas y antagonistas microbianos sobre los microorganismos causales del deterioro poscosecha de la caña y su impacto en las pérdidas de sacarosa en el ingenio. Tesis Tecnóloga avanzada. Instituto politécnico nacional. Tlaxcala, 2008. 91 p.

WROLSTAD, R; LAURO, G y FRANCIS, F. Anthocyanins. En: Natural Food Colorants. New York. 2000. p 237-252.

ZAMORA, M; MOLINA, M y CHACÓN, G. Evaluación efecto de la temperatura, concentración y flujo volumétrico en la hidrólisis de la sacarosa mediante una invertasa inmovilizada en un reactor esférico. En: Ingeniería, Vol. 21, Art.1. San José de Costa Rica. 2011. ISSN 1409-2441

ZOSSI, S; CÁRDENAS, G; SOROL, N y SASTRE, M. Influencia de compuestos azúcares y no azúcares en la calidad industrial de caña de azúcar en Tucumán (R. Argentina). En: Revista industrial y agrícola de Tucumán, Junio, vol.87 no.1 Las Talitas. 2010. ISSN 1851-3018.

## **ANEXOS**

Ver anexos en documento adicional.