

**OBTENCIÓN DE JARABES DE GLUCOSA A PARTIR DE LA HIDRÓLISIS DEL  
ALMIDÓN DE YUCA:  
ETAPAS DE PRECONCENTRACIÓN Y CONCENTRACIÓN**

**Sonia Rocío Rodríguez Castellanos**

**Julie Tatiana Sandoval Rodríguez**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2011**

**OBTENCIÓN DE JARABES DE GLUCOSA A PARTIR DE LA HIDRÓLISIS DEL  
ALMIDÓN DE YUCA:  
ETAPAS DE PRECONCENTRACIÓN Y CONCENTRACIÓN**

**Sonia Rocío Rodríguez Castellanos**

**Julie Tatiana Sandoval Rodríguez**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el Título de  
Ingeniero Químico**

**Director:**

**CARLOS JESÚS MUVDI NOVA**

**Ing. Químico, M.Sc., Ph.D.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA  
BUCARAMANGA**

**2011**

## AGRADECIMIENTOS

Las autoras del presente trabajo expresan sus agradecimientos a:

**Dios**, por bendecirnos con una maravillosa experiencia y un éxito más.

La **Universidad Industrial de Santander** por acogernos e instruirnos brindándonos los medios y espacios para nuestra formación personal y profesional

Al profesor **Carlos Jesús Muvdi Nova** por su continua enseñanza, colaboración y confianza.

Al **Laboratorio PROBIOGEM**, Universidad de Lille-1 en Francia por darnos la oportunidad de hacer parte de su grupo de trabajo, por su amable acogida, instrucción y colaboración.

Al **Centro de Investigación en Ciencia y Tecnología de los Alimentos CICTA** de la Universidad Industrial de Santander por su disposición.

La empresa **PROMITEC SANTANDER S.A.S.** por su valiosa colaboración facilitando nuestro trabajo.

Nuestras familias y amigos

*A Dios por la vida, la salud y por guiar mi camino.*

*A mi madre por su incansable esfuerzo, dedicación y amor que me impulsan cada día a vivir, superar cualquier reto y ser mejor persona para seguir su maravilloso ejemplo.*

*A toda mi gran y hermosa familia por su compañía, respaldo y total apoyo, quienes me brindan felicidad y siempre me recuerdan que todo es posible.*

*A mis amigos por acompañarme en este arduo camino y compartir tantos esfuerzos, preocupaciones, triunfos y alegrías.*

*A Julie por su valiosa compañía, paciencia y disposición.*

**Sonia Rocío Rodríguez Castellanos**

*A Dios por guiar mi vida y enseñarme que nada es imposible, sí es su voluntad  
sucederá.*

*A mis padres y mi hermanita por brindarme todo su amor, motivación y apoyo  
incondicional.*

*A mi familia, especialmente a mi tío Manolo por su confianza, apoyo y respaldo.*

*A mis amigos por su valiosa compañía y amistad y por haber confiado en mí.*

*A Sonia por su amistad, compañía y paciencia durante esta experiencia.*

***Julie Tatiana Sandoval Rodríguez.***

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	14
1. PROBLEMÁTICA Y JUSTIFICACION	15
2. ESTADO DEL ARTE	16
3. CONCEPTOS TEORICOS	19
4. DESARROLLO EXPERIMENTAL	23
4.1. DESARROLLO EXPERIMENTAL ÓSMOSIS INVERSA	23
4.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL EVAPORADOR DE PELICULA ASCENDENTE	24
5. RESULTADOS Y ANALISIS	27
5.1. ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS DE CONCENTRACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA	27
5.2. ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS DE CONCENTRACIÓN MEDIANTE EL EVAPORADOR DE PELÍCULA ASCENDENTE	29
5.2.1. Efecto del proceso de evaporación en película ascendente sobre la calidad del producto (análisis basado en el color del producto).	33
5.3. COMPARACIÓN DE LA TÉCNICA DE EVAPORACIÓN DE PELÍCULA ASCENDENTE RESPECTO A LA EVAPORACIÓN TRADICIONAL	35
5.3.1. Consumo de energía.	35
5.3.2. Efectos sobre la calidad del producto (análisis basado en el color del producto).	36
6. CONCLUSIONES	38
7. TRABAJOS FUTUROS A CONSIDERAR	39
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Hervidor al vacío enchaquetado.	20
<b>Figura 2.</b> Evaporador de película ascendente.	21
<b>Figura 3.</b> Membrana de ósmosis inversa.	22
<b>Figura 4.</b> Diagrama de bloques del desarrollo experimental.	23
<b>Figura 5.</b> Diagrama del piloto de ósmosis inversa.	23
<b>Figura 6.</b> Diagrama Piloto Evaporador de Película Ascendente.	25
<b>Figura 7.</b> Vol. de permeado Vs tiempo para las membranas Filmtec® (a) y PCI-AFC 99® (b).	27
<b>Figura 8.</b> °Brix del retenido Vs tiempo para las membranas Filmtec® (a) y PCI® (b).	29
<b>Figura 9.</b> Comparación de la concentración inicial (A) y final obtenida (B) en cada experimento para distintas condiciones de presión de trabajo y de temperatura de vapor de calentamiento.	30
<b>Figura 10.</b> Factor de concentración volumétrico.	31
<b>Figura 11.</b> Factor de concentración.	31
<b>Figura 12.</b> Consumo de Energía evidenciado para las pruebas de evaporación de película ascendente.	32
<b>Figura 13.</b> Temperatura de ebullición de la solución para las concentraciones iniciales de 10% w/w (a) y 40% w/w (b). A=original; B=duplicado.	33
<b>Figura 14.</b> Valores de absorbancia en el espectro visible para el jarabe concentrado por evaporación de película ascendente a distintos niveles de concentración. Muestras diluidas hasta una concentración de 20,25 °Brix.	34
<b>Figura 15.</b> Energía consumida por kilogramo de jarabe alimentado por el evaporador enchaquetado (técnica utilizada por la empresa) y de evaporación de película ascendente.	36
<b>Figura 16.</b> Valores detallados de absorbancia a 440 nm para el jarabe evaporado mediante evaporación de película ascendente, leídos a 61,25 °Brix (a) y evaporación tradicional leídos 57 °Brix (b).	37

## RESUMEN

**TITULO:** OBTENCIÓN DE JARABES DE GLUCOSA A PARTIR DE LA HIDROLISIS DEL ALMIDÓN DE YUCA: ETAPAS DE PRECONCENTRACIÓN Y CONCENTRACIÓN.\*

**AUTORES:** Sonia Rocío Rodríguez Castellanos, Julie Tatiana Sandoval Rodríguez.\*\*

**PALABRAS CLAVES:** Concentración, Hidrolizados, Almidón, Ósmosis inversa, Evaporación, Película ascendente.

El objetivo de este proyecto fue evaluar los procesos de ósmosis inversa y evaporación de película ascendente como métodos alternativos a la evaporación tradicional con hervidores al vacío para la concentración de jarabes de glucosa obtenidos a partir de la hidrólisis del almidón de yuca. Para la ósmosis inversa se evaluaron presiones de 21 y 37,5 Bar y temperaturas de 22 y 35,5 °C en dos módulos membranarios, Filmtec (2 m<sup>2</sup>) y PCI (0,9 m<sup>2</sup>), obteniéndose los mejores resultados a 37,5 Bar y 35,5°C con el módulo Filmtec (mayor superficie de membrana). Bajo estas condiciones se realizó una separación de 2/3 del volumen inicial en 18 minutos. Debido a la concentración final alcanzada, este método se estableció como técnica de preconcentración. Para la evaporación de película ascendente, se evaluaron presiones de 100 y 200 mBar y temperaturas de 105 y 115 °C, a dos concentraciones de alimentación diferentes de 10 y 40% w/w. De los resultados se concluye que los factores de concentración y de concentración volumétrico no dependen significativamente de las diferentes condiciones de operación; tomando valores de 1,5 y 1,8 respectivamente. Una comparación a nivel de consumo energético muestra que la evaporación tradicional consume 150 veces más energía que la evaporación de película ascendente, pero esta última presenta un efecto más notorio sobre la calidad del producto.

---

\* Proyecto de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico Químicas. Escuela de Ingeniería Química. Director: Ph.D. Carlos Jesús Muvdi Nova.

## ABSTRACT

**TITLE:** PRODUCTION OF GLUCOSE SYRUPS FROM CASSAVA STARCH HYDROLYSIS: PRECONCENTRATION AND CONCENTRATION STEPS.\*

**AUTHORS:** Sonia Rocío Rodríguez Castellanos, Julie Tatiana Sandoval Rodríguez.\*\*

**KEYWORDS:** Concentration, Hydrolysates, Starch, Reverse Osmosis, Evaporation, Climbing Film.

The target of this project was to evaluate the processes of reverse osmosis and climbing film evaporation as alternative methods to the traditional evaporation with vacuum batch pan for the concentration of glucose syrups obtained from the hydrolysis of the cassava starch. For the reverse osmosis were evaluated pressures of 21 and 37,5 Bar and temperatures of 22 and 35,5 °C in two membrane modules, Filmtec (2 m<sup>2</sup>) and PCI (0,9 m<sup>2</sup>), the best results being obtained at 37,5 Bar and 35,5°C; with the Filmtec module (major membrane surface area). Under these operation conditions, it was possible to obtain a separation of 2/3 of the initial volume in 18 minutes. Due to the final concentration reached, this method was established as a preconcentration technique. For the climbing film evaporation were evaluated pressures of 100 and 200 mBar and temperatures of 105 and 115 °C at two different feeding concentrations of 10 and 40% w/w. The results show that the concentration and concentration volumetric factors do not depend considerably from the different operating conditions; taking values of 1,5 and 1,8 respectively. A comparison at level of energy consumption shows that the traditional evaporation consumes 150 times more energy than the climbing film evaporation, but the last one presents a more significant effect on the color of the product.

---

\* Reserch Project

\*\* Physical–Chemical Engineering College. Chemical Engineering Department. Advisors: Ph.D. Carlos Jesús Muvdi Nova.

## INTRODUCCIÓN

Los edulcorantes se emplean en los alimentos para otorgarles sabor dulce, modificar sus propiedades físicas y químicas o para su conservación<sup>[1]</sup>. La sacarosa es la más utilizada en el mundo aunque su uso empezó a disminuir a principios de los ochenta, debido al auge de los jarabes de fructosa y glucosa<sup>[2]</sup>. Estos jarabes son obtenidos por hidrólisis del almidón; los cuales contienen una mezcla de glucosa, fructosa y oligosacáridos en diferentes proporciones, con composición y poder edulcorante variables<sup>[3]</sup>. Para la obtención de los jarabes es necesario realizarle al hidrolizado un proceso de purificación (para mejorar sus características físicas) y de concentración (disminuyendo la actividad acuosa) con el fin de preservarlo y facilitar su transporte y almacenamiento<sup>[4]</sup>.

La etapa de concentración generalmente se realiza en hervidores clásicos al vacío. Esto implica un alto gasto energético y tiempos de procesamiento considerables, ocasionando degradación térmica del producto y aumento de los tiempos de producción. Debido a estas desventajas, se evalúa la aplicación de técnicas alternativas tales como la ósmosis inversa y la evaporación de película ascendente<sup>[5]</sup>.

En este trabajo se realiza el estudio experimental del proceso de concentración de hidrolizados de almidón de yuca. Dentro de sus objetivos se encuentran el análisis de las variables más influyentes de cada uno de estos procesos (presión, temperatura y concentración de alimentación) sobre características como consumo de energía y calidad del producto obtenido y su posterior comparación con el proceso de concentración tradicional al vacío empleado por la empresa PROMITEC SANTANDER S.A.S.

Los experimentos se llevaron a cabo en pilotos facilitados por el laboratorio ProBioGEM de la Universidad de Lille-1 Francia y se realizaron con hidrolizados de glucosa concentrados elaborados por la empresa Promitec Santander S.A.S. Por otra parte, los datos de la evaporación tradicional fueron tomados en dicha empresa, bajo sus propias condiciones de operación.

## 1. PROBLEMÁTICA Y JUSTIFICACIÓN

Dentro del proceso de producción de edulcorantes a partir de hidrolizados de almidón, la etapa de concentración es la de mayor consumo energético<sup>[6]</sup>. Esto se debe principalmente a los métodos tradicionales empleados para la evaporación del agua en solución y consiguiente concentración de los sólidos disueltos; estos métodos, además de generar un alto consumo energético, afectan la calidad del producto principalmente debido a la degradación térmica (caramelización) resultado de una exposición prolongada a temperaturas elevadas<sup>[4]</sup>. Esta condición plantea un reto en el estudio de nuevas tecnologías en la industria alimenticia orientadas a la solución de dicha problemática.

Entre las soluciones planteadas encontramos procesos no térmicos como los procesos membranarios de ósmosis inversa y también procesos térmicos como los evaporadores de película (ascendente y descendente). Entre las ventajas con las que cuentan estos métodos, sobresalen el tratamiento del producto en condiciones moderadas de operación, tiempos de residencia cortos, y el diseño compacto y de fácil instalación<sup>[7]</sup>.

Debido a la creciente rentabilidad en la producción y empleo del almidón de yuca en Colombia y a su próspera utilización como alternativa al uso del almidón de maíz, se ha venido incrementando su consumo como materia prima en la elaboración de edulcorantes a partir de almidón<sup>[8]</sup>; con lo cual se ha presentado la necesidad de realizar estudios experimentales de los métodos anteriormente mencionados de forma a evaluar su aplicabilidad para este tipo de materia prima.

Para ello se contó con el apoyo del Laboratorio Probiogem / IUT A Lille, FRANCIA, quien facilitó el préstamo de los equipos utilizados en el presente trabajo (pilotos de película ascendente y de ósmosis inversa).

## 2. ESTADO DEL ARTE

La evaporación es un proceso muy utilizado en las industrias alimentarias y a su vez es el de mayor consumo energético. Bichsel *et al.*(1982)<sup>[5]</sup> y Hinkova *et al.*(2002)<sup>[6]</sup>, aseguran que aproximadamente el 50% de la energía utilizada para producir azúcar de caña es consumida durante la etapa de evaporación del jugo azucarado diluido. Igualmente plantean la potencial aplicación de la ósmosis inversa en las primeras etapas de concentración (antes de la evaporación); de forma a reducir el gasto energético. Bichsel *et al.*(1982)<sup>[5]</sup> indican que la mayor reducción de consumo de energía se da en la concentración de jugo diluido desde 12 °Brix hasta un máximo de 30 °Brix para una presión osmótica alrededor de 35 bar.

Madaeni *et al.*(2010)<sup>[9]</sup> estudiaron la aplicación de procesos membranarios de ósmosis inversa para la pre-concentración del jugo azucarado diluido mediante dos etapas membranarias con recirculación. En este trabajo los investigadores concluyen que con la utilización de la ósmosis inversa como método de pre-concentración, seguido de una etapa de concentración con un evaporador de ebullición tradicional, se logra un ahorro de energía del 33% respecto a realizar toda la concentración empleando únicamente un evaporador de ebullición. El estudio se basó en un tratamiento a escala de laboratorio operado a 45 °C y 22 bar de presión transmembranaria. Igualmente se evidencia que a mayores concentraciones, el fenómeno de polarización de concentración (acumulación de solutos sobre la membrana) aumenta y los flujos de permeado disminuyen. Así mismo existe una tendencia al aumento del flujo de permeado ocasionado por el incremento de temperatura durante el proceso.

A una conclusión similar llegan Jesus *et al.*(2007)<sup>[10]</sup> con sus experimentos para concentrar jugo de naranja a 3 diferentes presiones transmembranarias (20, 40 y 60 bar) en continuo (recirculando tanto permeado como retenido) y en batch, con el objetivo de evaluar la influencia de la presión transmembranaria sobre el flujo de permeado y el producto concentrado. Para los experimentos en continuo, se observó que, para las tres presiones estudiadas, el flujo inicial de permeado

decreció a los 15 min de proceso y se estabilizó alrededor de los 80 min. Señalan que esta disminución en el flujo de permeado es consecuencia de la polarización de concentración sobre la superficie de la membrana, la cual está relacionada con el aumento de la concentración de solutos en la interface membrana/jugo y es la responsable de la disminución del flujo de permeado al inicio del proceso. Para los experimentos en batch, se vio que el flujo de permeado disminuyó a medida que el factor de concentración aumentó. Sus causas son la polarización de concentración, fenómenos de ensuciamiento y el aumento de la presión osmótica y de la viscosidad de la solución. El mayor factor de concentración se obtuvo a la mayor presión transmembranaria. La retención de azúcares y vitamina C no fue del 100% de acuerdo a análisis realizados en el permeado. El jugo de naranja concentrado por ósmosis inversa presentó un aroma característico mejor preservado comparado con el jugo concentrado por evaporación térmica.

Gurak *et al.*(2010)<sup>[11]</sup>, estudiaron la concentración del jugo de uva mediante ósmosis inversa en función de la presión (40,50 y 60 bar) y la temperatura (20,30 y 40 °C); en el estudio se escogieron las mejores condiciones de proceso (60 bar y 40°C) basadas en el mayor flujo de permeado sin presencia de cambios significativos en el color del producto como indicador de la calidad. También observaron una disminución del flujo de permeado durante el proceso justificada bajo los mismos argumentos ya expuestos.

Posterior a la etapa de preconcentración antes descrita, en la industria, la etapa de concentración generalmente se llevaría a cabo mediante sistemas clásicos de evaporación (hervidores)<sup>[12]</sup>. Sin embargo varios autores han venido estudiando el comportamiento de una técnica de evaporación alternativa como lo es el evaporador de película; los estudios analizan los posibles factores que pueden influir en este proceso. Walthew *et al.*(1996)<sup>[13]</sup> muestran un aumento del coeficiente de transferencia de calor a mayores niveles de  $\Delta T$  (entre la superficie caliente y el alimento), debido a la formación de una mayor turbulencia que reduce la resistencia a la transferencia; un incremento en el flujo de alimentación influye también en el aumento del coeficiente de transferencia de calor a largo plazo,

mediante la reducción de la tasa a la que dicho coeficiente disminuye debido al ensuciamiento.

Pacheco *et al.*(2003)<sup>[14]</sup> aseguran que una caída en el coeficiente de transferencia de calor en un evaporador de película ascendente/descendente está relacionada con un aumento de la concentración y de la viscosidad.

Por otro lado, Walthew *et al.*(1996)<sup>[13]</sup> señalan que valores altos de temperatura ocasionan un sobresecado (colmatación) en la parte superior de la columna, fenómeno que se acelera si se emplea también un flujo de alimentación pequeño.

Estos estudios nos dan una idea de la aplicabilidad de la concentración de soluciones empleando técnicas alternativas como ósmosis inversa y evaporador de película; evidenciando la necesidad de analizar el comportamiento de dichos métodos en la concentración de jarabes de glucosa provenientes del almidón de yuca.

### 3. CONCEPTOS TEÓRICOS

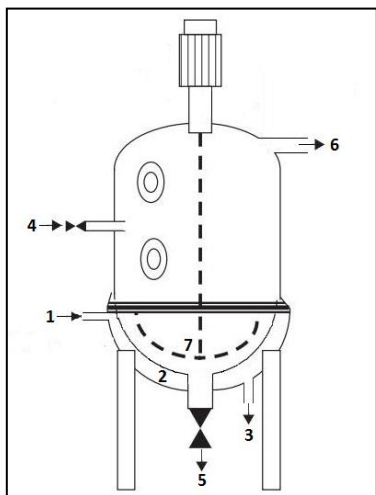
El jarabe de glucosa es un líquido altamente viscoso (2.140cps a 75% de materia seca, 53,7 dextrosa equivalente y 26,7°C<sup>[15]</sup>); es una solución de glucosa concentrada con contenido también de dextrinas y maltodextrinas (maltosa y otros sacáridos nutritivos)<sup>[15]</sup>. Se obtiene a partir de la hidrólisis del almidón que puede ser ácida o enzimática; aunque la hidrólisis enzimática ha desplazado industrialmente a la hidrólisis ácida y ha ganado ventaja en su aplicación<sup>[16]</sup>. La materia prima, el almidón, es un carbohidrato polisacárido inodoro e insípido, que se presenta en forma de grano o polvo, está formado por una mezcla de dos tipos de polímeros de  $\alpha$ -glucosa; la amilosa y la amilopectina. El almidón es producido por la mayoría de plantas como una forma para almacenar energía, es por esto que se puede encontrar en diversas fuentes siendo el maíz y el trigo las más utilizadas industrialmente debido a su abundancia<sup>[17]</sup>. Sin embargo últimamente se han venido empleando diferentes fuentes como el arroz, la papa, el plátano y la yuca. Teniendo en cuenta que Colombia es un importante productor de yuca en América Latina<sup>[8]</sup>, esta será la fuente de almidón para este estudio.

El proceso de producción del jarabe de glucosa empieza por la hidrólisis del almidón en un reactor enzimático agitado, a temperaturas que se encuentran entre los 70 y 80 °C y pH entre 4 y 5 (las condiciones definitivas dependen del tipo de enzima). Generalmente se usan las enzimas  $\alpha$ -amilasa y glucoamilasa<sup>[18]</sup>, en dos etapas separadas. En una primera fase de hidrólisis (licuefacción), la  $\alpha$ -amilasa realiza el proceso de rompimiento de los enlaces  $\alpha(1\rightarrow4)$ . De esta etapa se obtienen maltodextrinas ramificadas de peso molecular mediano. Posteriormente en la segunda fase de hidrólisis (sacarificación), la glucoamilasa rompe los enlaces  $\alpha(1\rightarrow6)$  para tener finalmente cadenas de glucosa y maltosa<sup>[19]</sup>. Esta solución se lleva a un proceso de purificación y desalado para posteriormente ser concentrada.

La concentración es importante debido a que es una forma de conservación bastante eficiente para algunos alimentos y además ofrece ventajas económicas ya que reduce el peso y el volumen del producto<sup>[20]</sup>. Existen varias técnicas de

concentración que se pueden clasificar en térmicas y no térmicas. Dentro de las térmicas la más utilizada es la evaporación, la cual se emplea para eliminar parcialmente por ebullición el agua de alimentos líquidos<sup>[21]</sup>.

La evaporación en la industria de alimentos comúnmente se realiza mediante hervidores al vacío calentados por vapor (Figura 1), los cuales emplean temperaturas elevadas y tiempos de procesamiento considerables; lo que afecta la calidad de un gran número de productos alimenticios y disminuye la eficiencia del proceso debido a la acumulación de compuestos sobre la superficie de intercambio (resultado del aumento de la viscosidad y la degradación térmica).



1. Entrada de suministro de vapor; 2. Camisa externa; 3. Salida de condensado; 4. Entrada de producto; 5. Salida de producto; 6. Salida de vapores y entrada de la bomba de vacío; 7. Agitador

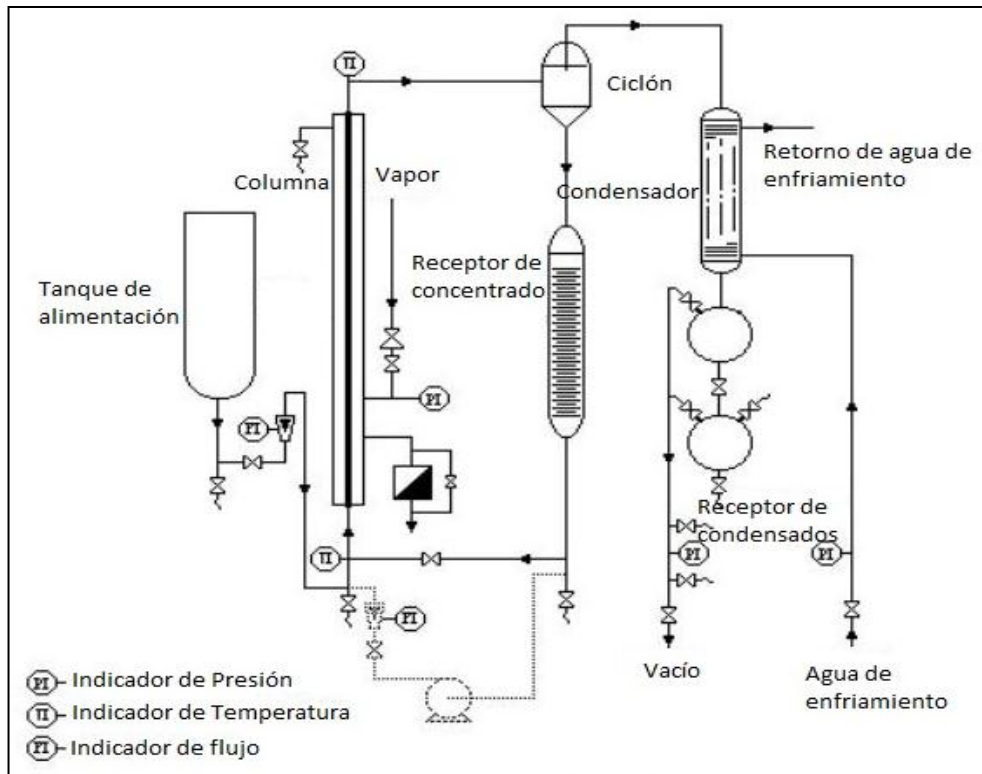
Fuente: Food process engineering and technology (Cap. 21).  
Zeki Berk. 2009

**Figura 1. Hervidor al vacío enchaquetado**

Estos hervidores batch pueden ser enchaquetados o tener intercambiadores internos. Las áreas de transferencia de calor generalmente son pequeñas debido a la forma del hervidor y los coeficientes de transferencia de calor tienden a ser bajos a condiciones de convección natural, aunque pueden ser mejorados mediante un sistema de agitación<sup>[12]</sup>.

Por otra parte, existen otros métodos para llevar a cabo la evaporación. Entre ellos se destacan los evaporadores de película, los cuales disminuyen el daño térmico de la solución gracias al menor tiempo de contacto con la superficie caliente<sup>[20]</sup>. Dentro de estos tipos de evaporadores están los de película ascendente, película descendente, de superficie rotatoria y de película raspada<sup>[22]</sup>; siendo la técnica de

concentración con evaporador de película ascendente (Figura 2) la utilizada en este estudio.



Fuente: De Dietrich Process Systems. Evaporation-Climbing Film and Natural Circulation Evaporator. Tomado el 27 de Abril de 2010 desde <http://www.ddpsinc.com/TeachingUnits/qts4.html>

**Figura 2. Evaporador de película ascendente**

Este método de evaporación consiste en alimentar el producto a procesar en la parte inferior de la columna mediante una bomba. Cuando el vapor de calentamiento se hace pasar por la columna, el líquido alimentado ebulle y genera un volumen importante de vapor emitido que se eleva a gran velocidad y arrastra una película a lo largo del interior del tubo hasta el ciclón donde ocurre la separación del líquido y el vapor emitido. Generalmente se trabaja bajo condiciones de vacío para disminuir el punto de ebullición, y de esta forma afectar en menor grado al producto alimenticio<sup>[23]</sup>. La principal ventaja de esta técnica es que no se requiere bombear la película líquida, mientras que su mayor desventaja es el requerimiento de una gran diferencia de temperatura entre el alimento y la superficie caliente para favorecer la transferencia de calor<sup>[22]</sup>.

Dentro de los métodos de concentración no térmicos, uno que se encuentra en desarrollo es la ósmosis inversa o hiperfiltración. Este es un proceso de separación membranaria que implica el paso de agua a través de una membrana de permeabilidad selectiva (Figura 3), desde una zona de mayor concentración a otra de menor concentración; mediante la aplicación de una presión superior a la presión osmótica en el lado de mayor concentración<sup>[20]</sup>.



Fuente: GEA. [www.geafiltration.com](http://www.geafiltration.com)

**Figura 3. Membrana de ósmosis inversa**

La principal ventaja de la concentración por membrana con respecto a la concentración por evaporación es una reducción del daño causado por tratamiento térmico; resultando en una mejor conservación de las características nutricionales, sensoriales y de sustancias volátiles del producto. En contraste con la ebullición, la concentración por membrana no exige un cambio de fase, por lo que la energía se utiliza más eficazmente. Otras ventajas de este proceso son menores gastos en funcionamiento y mano de obra y mayor sencillez en las instalaciones; ya que solo requiere una válvula de control y no precisa de generadores de vapor. Las principales desventajas son las variaciones en el flujo del producto a filtrar como consecuencia de los cambios en la concentración del mismo. Solamente permiten la concentración del producto hasta máximo un 30% de sólidos totales y la posible colmatación de las membranas disminuye el tiempo de funcionamiento efectivo<sup>[24]</sup>.

## 4. DESARROLLO EXPERIMENTAL

La metodología empleada para el desarrollo y cumplimiento de los objetivos del proyecto se muestran en la Figura 4. Este desarrollo experimental se realizó con hidrolizados de glucosa concentrados elaborados por la empresa Promitec Santander S.A.S. tanto para los experimentos de ósmosis inversa como de evaporador de película ascendente, los cuales se describen a continuación.

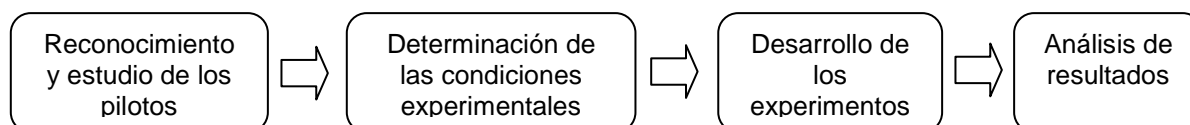
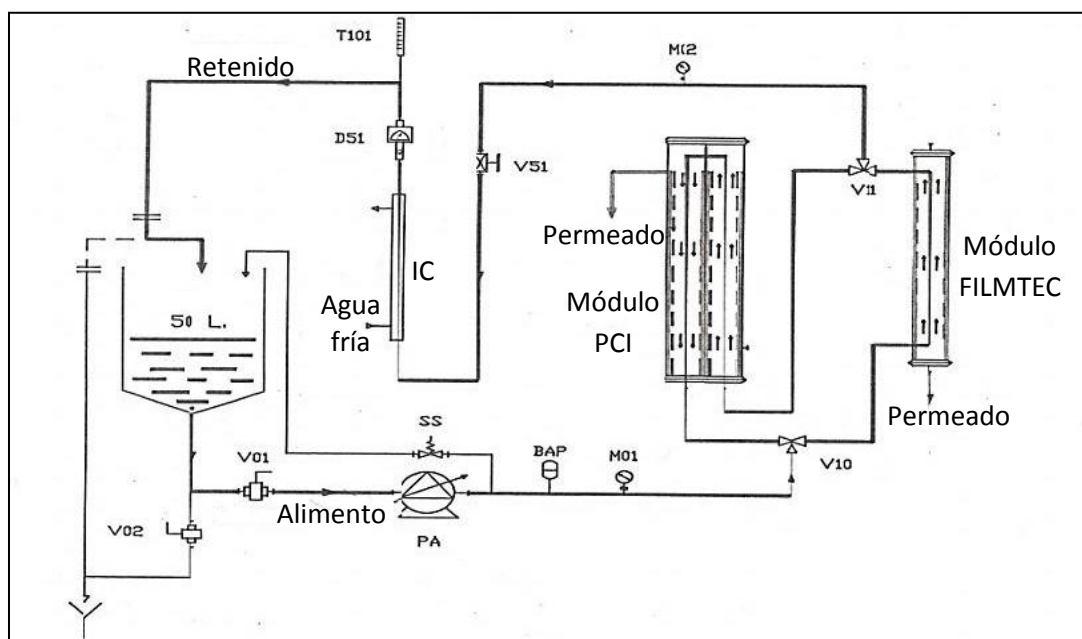


Figura 4. Diagrama de bloques del desarrollo experimental

### 4.1. DESARROLLO EXPERIMENTAL ÓSMOSIS INVERSA

La Figura 5 representa el diagrama del piloto del proceso de ósmosis inversa empleado para los experimentos de preconcentración del jarabe de glucosa.



Fuente: laboratorio Probiogem/USTL1 Francia

Figura 5. Diagrama del piloto de ósmosis inversa

El piloto de ósmosis inversa utilizado consta de un tanque de alimentación con capacidad de 50 L; el sistema posee una bomba recíproca de alta presión para la

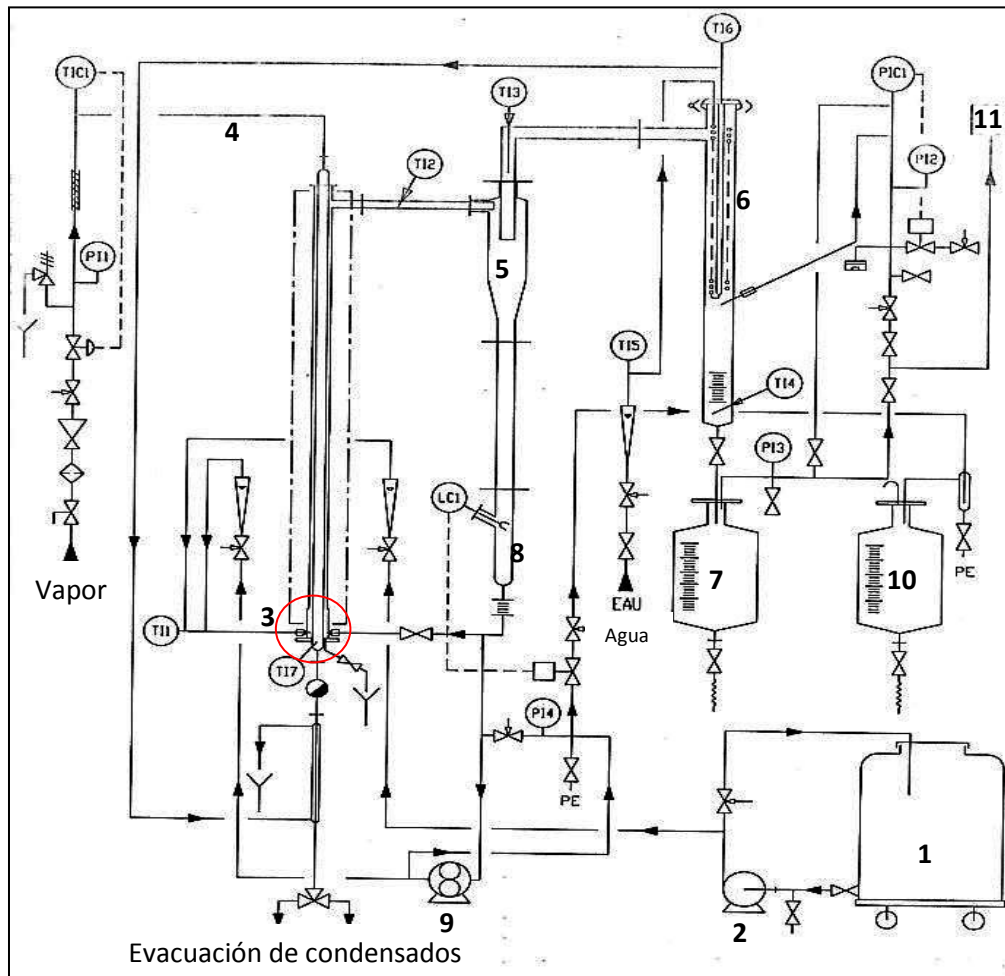
circulación del alimento en el mismo. Las membranas empleadas en este piloto son de material orgánico (Filmtec® y PCI-AFC99®). El módulo Filmtec® tiene una superficie membranaria de 2 m<sup>2</sup> y una presión y temperatura máximas de 69 bar y 45 °C, mientras que para el módulo PCI® son de 70 bar y 70 °C y la superficie membranaria es de 0,9 m<sup>2</sup>. El retenido (Figura 3) que se obtiene a la salida del módulo de filtración pasa hacia un enfriador para ser recirculado al tanque de alimentación.

Las condiciones experimentales estuvieron limitadas por dos factores que son la cantidad de materia prima disponible y las características del piloto de ósmosis inversa. Se plantea un diseño experimental factorial en donde las variables son la presión y la temperatura. El mayor nivel de presión está restringido por el límite de trabajo de la bomba del piloto y corresponde a 36 bar. El menor nivel de presión se consideró como un valor intermedio y fue de 20 bar. A su vez, el mayor nivel de la variable temperatura se determinó teniendo en cuenta la temperatura máxima de resistencia y un margen apropiado de seguridad para la membrana Filmtec®. Es así que se decidió trabajar con una temperatura de 35 °C. De nuevo, como menor nivel se utilizó un valor intermedio de 22 °C. Para cada experimento se hicieron mediciones periódicas de los volúmenes de permeado y de los °Brix para el retenido y el permeado.

#### **4.2. DESARROLLO EXPERIMENTAL EVAPORADOR DE PELICULA ASCENDENTE**

La Figura 6 corresponde al esquema detallado del piloto de evaporador de película ascendente. Este consta de una bomba centrífuga de alimentación (2) (potencia instalada de 0,25 kW) que hace circular la solución a concentrar desde el tanque de alimentación (1) hacia la base de la columna (3). Una vez llena la base con solución, se hace circular vapor sobrecalentado (4) por el interior del tubo intercambiador, para calentar la solución hasta su punto de ebullición y, con el impulso del vapor generado, transportar la solución (que se va concentrando) en forma de una película de líquido hasta la cima de la columna. Esta mezcla líquido-

vapor se separa con un ciclón (5); el vapor es condensado sobre un serpentín (6) y recogido en un balón (7). En el fondo del ciclón (8) el líquido es bombeado (bomba de engranajes (9)) a un tanque de almacenamiento (10). Este piloto puede trabajar al vacío (bomba de vacío (11), 8 mbar abs de presión mínima).



Fuente: laboratorio Probiogem/USTL1 Francia

**Figura 6. Diagrama Piloto Evaporador de Película Ascendente**

Las condiciones experimentales se establecieron tomando en cuenta las empleadas por la empresa Promitec Santander S.A.S, las especificaciones del piloto y la cantidad de materia prima disponible. Se planteó un diseño experimental factorial  $2^2$ , variando la temperatura y la presión para dos concentraciones de alimentación diferentes. Respecto a la concentración inicial, se tomaron los valores de 10% y 40% w/w. El de 10% se debe a que es aproximadamente la concentración de la solución obtenida de la hidrólisis y el de 40% es debido a que

era el máximo valor permitido por la cantidad de materia prima disponible. Para la variable temperatura se utilizaron dos condiciones: 115 °C, temperatura vapor cercana a la utilizada por la empresa Promitec Santander S.A.S (110 °C) y 105°C, temperatura mínima que asegura la ausencia de cambio de fase del vapor de calentamiento (para efectos de cálculo de consumo energético, la energía transferida será solo energía sensible).

La variable presión tomó valores de 200 mbar para asegurar una temperatura de ebullición inferior a la temperatura de degradación térmica de azúcares y un valor intermedio de 100 mbar. Para todos los experimentos se registraron periódicamente las temperaturas del vapor de caldera, de ebullición de la solución y del condensado de vapor de caldera, además de las observaciones presentes durante el proceso. Terminado el experimento, se determina su duración, las masas del condensado de vapor de caldera, del condensado (producto) y del concentrado; así como los °Brix finales.

Los datos obtenidos sirvieron para escoger las condiciones de operación más adecuadas (disminución del ensuciamiento de la columna y mayor factor de concentración). Con estas condiciones se realizaron otra serie de experimentos, esta vez recirculando hasta una concentración final permitida por el sistema (limitado por la bomba de recuperación de concentrado); buscando observar la máxima concentración que se puede alcanzar con el piloto. Este procedimiento se realizó tres veces, diluyendo cada vez hasta la concentración inicial; el objeto fue el de determinar la influencia del proceso sobre la calidad del producto. Esta repercusión en la calidad está relacionada con variaciones en el color en la mezcla; las cuales indican, para esta aplicación, el cambio en la composición debida a reacciones de caramelización presentes posiblemente durante el proceso de concentración<sup>[25]</sup>. Las muestras obtenidas se analizaron mediante espectrofotometría UV-visible, siendo esta una técnica empleada comúnmente para análisis de color<sup>[26][27]</sup>. Estos resultados fueron comparados posteriormente con los obtenidos experimentalmente utilizando los procesos propios de la empresa Promitec Santander S.A.S.

## 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

A continuación se presenta el resumen y el análisis de los resultados experimentales obtenidos para las dos técnicas de concentración estudiadas.

### 5.1. ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS DE CONCENTRACIÓN POR ÓSMOSIS INVERSA

La Figura 7 muestra el volumen de permeado obtenido en función del tiempo utilizando las membranas Filmtec® y PCI-AFC 99®; a distintas condiciones de temperatura y presión transmembranaria.

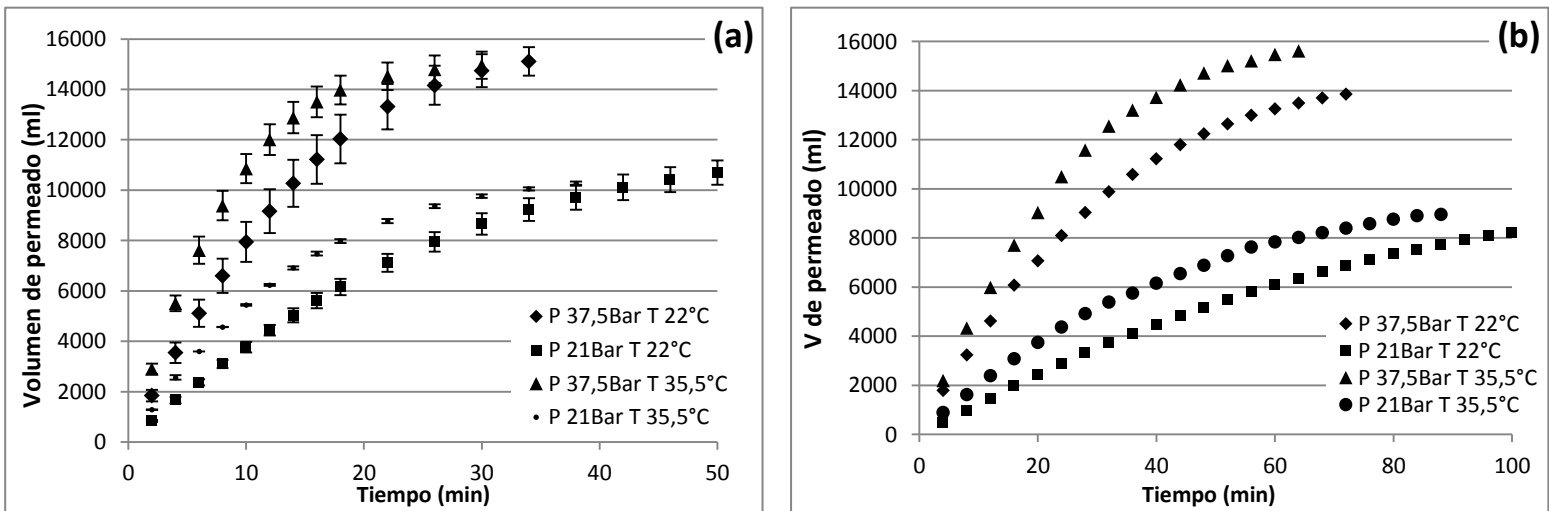


Figura 7. Vol. de permeado Vs tiempo para las membranas Filmtec®(a) y PCI-AFC 99®(b).

Observando los resultados obtenidos en la Figura 7 se puede notar un aumento del volumen total de permeado en el tiempo y una tendencia a estabilizarse después de cierto tiempo. Esto se traduce en una disminución de la velocidad de separación (filtración) a medida que la concentración de la alimentación aumenta. Este comportamiento se debe principalmente al aumento de la presión osmótica y la viscosidad de la solución resultado del incremento de su concentración<sup>[11]</sup>.

Así mismo en la Figura 7 se distinguen dos grupos de curvas; el primer grupo corresponde a los experimentos realizados a una presión transmembranaria de 37,5 bar y el segundo grupo a una presión de 21 bar. Se observa que una mayor

presión transmembranaria induce mayores volúmenes de permeado para un mismo tiempo; luego mayores flujos de permeación. Igualmente la temperatura favorece la filtración, esto debido a la disminución de la viscosidad de la solución y el aumento de los coeficientes de difusión a través del material membranario.

De ello se obtiene que el experimento a 37,5 bar y 35,5°C sea con el que se logran los mejores resultados. Para dicho experimento con la membrana Filmtec<sup>®</sup> se alcanzan a retirar 14000 ml de permeado de los aproximadamente 21500 ml de solución inicial (10% w/w) en 18 minutos; mientras que para la membrana PCI<sup>®</sup> se alcanzan a retirar 14000 ml de permeado de los 22000 ml de solución inicial (10% w/w) en 40 minutos. Esta diferencia de tiempo entre las dos membranas se debe a la diferencia en las superficies membranarias, ya que una es casi el doble de la otra (2 y 0,9 m<sup>2</sup> para las membranas Filmtec<sup>®</sup> y PCI<sup>®</sup> respectivamente).

Un punto interesante a resaltar está relacionado con una de las características más importantes de los procesos membranarios y es el de la linealidad a nivel de diseño-escalado. Para un mismo volumen de trabajo, si se duplica la superficie membranaria, se divide entre dos el tiempo de procesamiento; o expresado de otra manera, para un mismo tiempo de procesamiento, si se duplica la superficie membranaria multiplicaría por dos la capacidad del proceso.

Igualmente interesante es lo rápido del proceso de filtración. Si se toman en cuenta las mejores condiciones de operación (37,5 bar y 35,5°C) con la membrana Filmtec<sup>®</sup> (2m<sup>2</sup> de superficie de filtración), se observa una separación de cerca de 2/3 del volumen inicial en tan solo 20 minutos sin emplear temperaturas elevadas.

La Figura 8 muestra la variación de la concentración en función del tiempo para las dos membranas y bajo distintas condiciones de presión y temperatura. En ella se observa un mismo comportamiento para las dos membranas, con la diferencia que con la membrana Filmtec<sup>®</sup> se alcanza la misma concentración máxima que con la PCI<sup>®</sup> pero en aproximadamente la mitad del tiempo; esto debido a su mayor

área membranaria (casi del doble). Esta máxima concentración se encuentra alrededor de 25 °Brix; lo que confirma la utilización de este proceso de ósmosis inversa como etapa de pre-concentración; como lo afirman Hinkova *et al.*(2002)<sup>[6]</sup> y P. Fellows<sup>[24]</sup>. Una mayor concentración se alcanzará superando la presión osmótica a esa concentración; esto solo será posible incrementando la presión de trabajo.

Es importante comentar que la concentración del permeado se mantuvo alrededor de 0,25 y 1 °Brix. Esto nos permite asegurar que las membranas, en el rango de concentraciones de alimentación trabajado (10-25 °Brix), no pierden selectividad de forma significativa; que se podría esperar del proceso de ósmosis inversa como consecuencia del aumento de la concentración de azúcares en la alimentación.

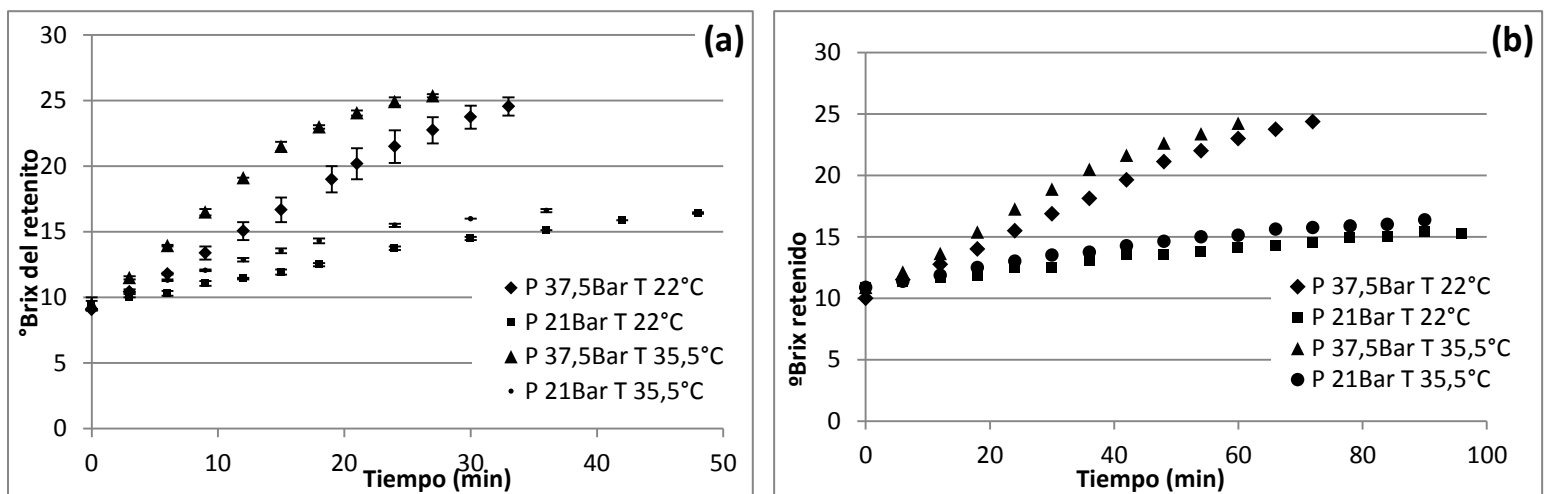


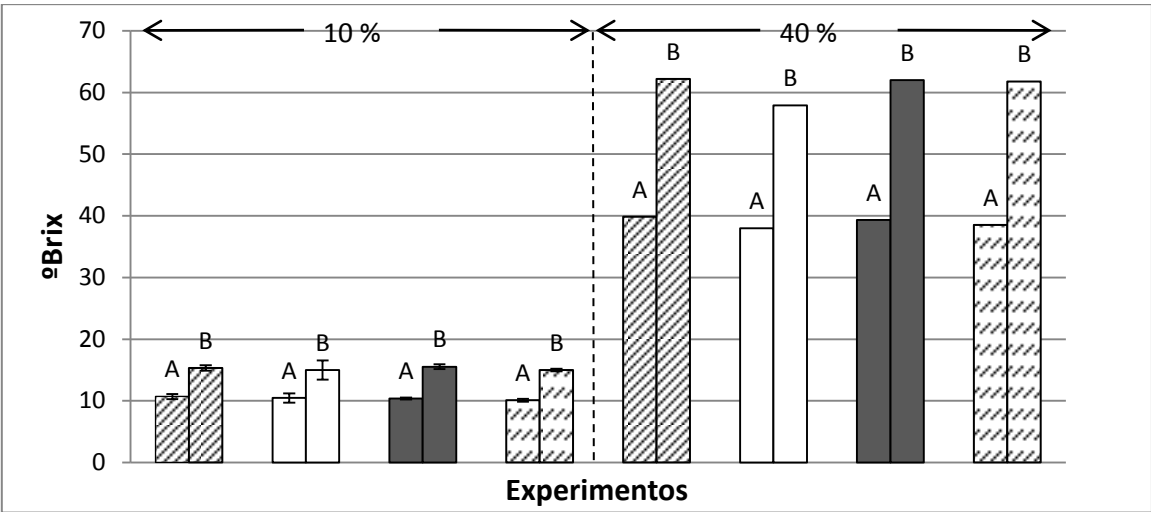
Figura 8. °Brix del retenido Vs tiempo para las membranas Filmtec<sup>®</sup> (a) y PCI<sup>®</sup> (b)

## 5.2. ANÁLISIS DE LAS PRUEBAS DE CONCENTRACIÓN MEDIANTE EL EVAPORADOR DE PELÍCULA ASCENDENTE

En la Figura 9 se comparan la concentración inicial y final obtenida en cada experimento a diferentes condiciones de presión de trabajo y de temperatura de vapor de calentamiento. Es importante aclarar que para los experimentos a la concentración de 40% no se pudieron realizar duplicados debido a su alta

demanda de materia prima. Sobre ese punto es importante recordar que los experimentos se realizaron en Francia con materia prima (jarabe de glucosa) colombiana.

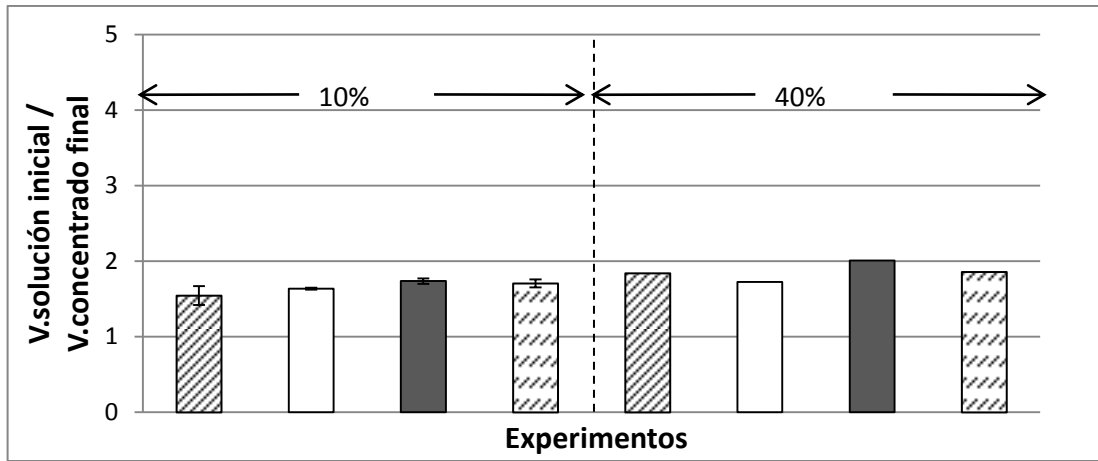
Los resultados que muestra la Figura 9 nos permite decir que a menores concentraciones iniciales se obtienen concentraciones finales menores, debido al mayor contenido de agua en la solución. Se observa que las distintas condiciones de presión y temperatura utilizadas no afectan la concentración final del producto (influenciada únicamente por la concentración inicial de la solución).



P 100mBar; T 105°C 
  P 100mBar; T 115°C 
  P 200mBar; T 105°C 
  P 200mBar; T 115°C  
 A °Brix solución inicial; B °Brix solución final

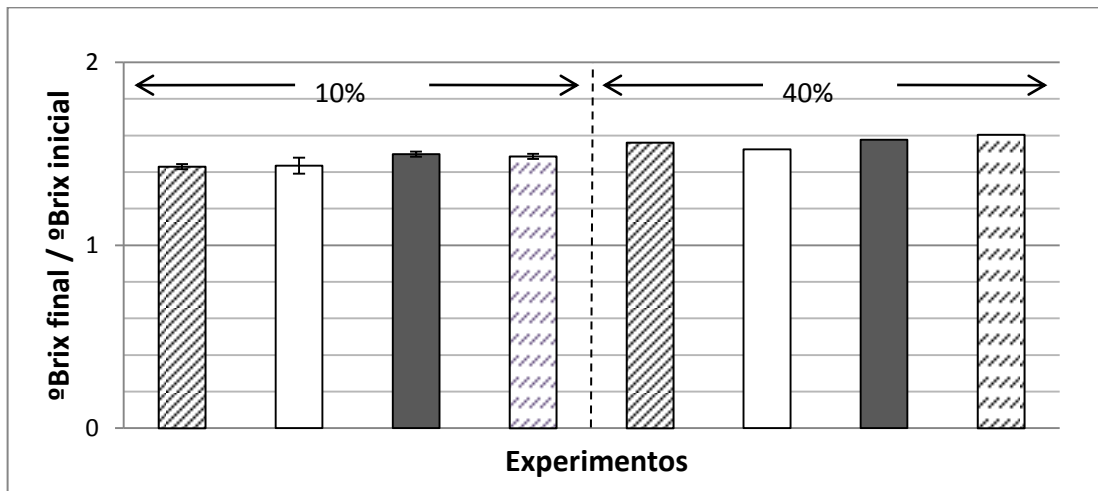
**Figura 9. Comparación de la concentración inicial (A) y final obtenida (B) en cada experimento para distintas condiciones de presión de trabajo y de temperatura de vapor de calentamiento.**

Las figuras 10 y 11 muestran los factores de concentración volumétrico y de °Brix, respectivamente, y refuerzan lo anteriormente dicho.



P 100mBar; T 105°C
  P 100mBar; T 115°C
  P 200mBar; T 105°C
  P 200mBar; T 115°C

**Figura 10. Factor de concentración volumétrico**



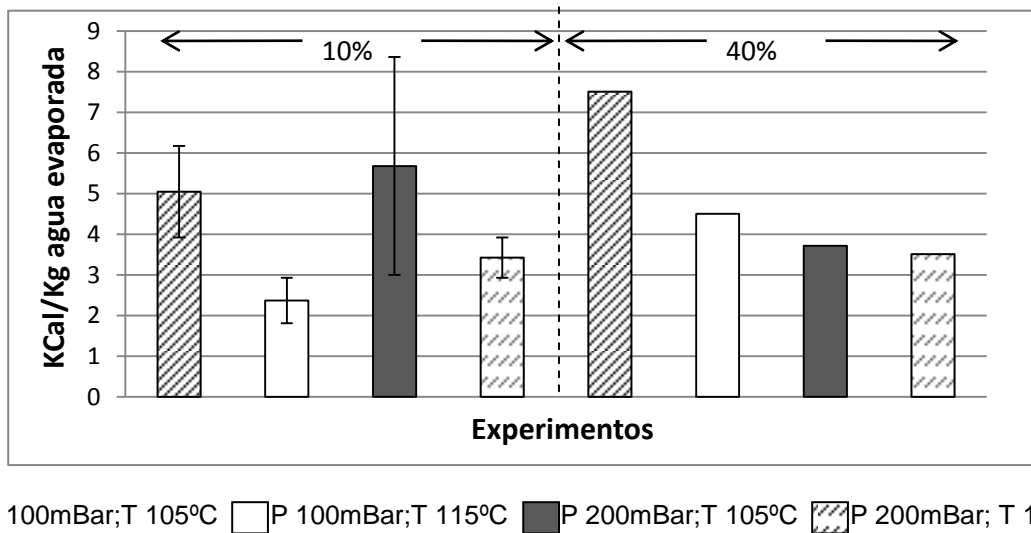
P 100mBar; T 105°C
  P 100mBar; T 115°C
  P 200mBar; T 105°C
  P 200mBar; T 115°C

**Figura 11. Factor de concentración**

En estas dos Figuras se observa que los factores de concentración tanto volumétrico como de °Brix conservan valores similares para las diferentes concentraciones iniciales y condiciones de operación, por lo tanto no hay incidencia de dichas variables sobre los factores de concentración. Estos resultados muestran que, en términos de productividad, son esencialmente las especificaciones del evaporador (longitud y diámetro del intercambiador) quienes determinan el alcance del proceso (factores de concentración).

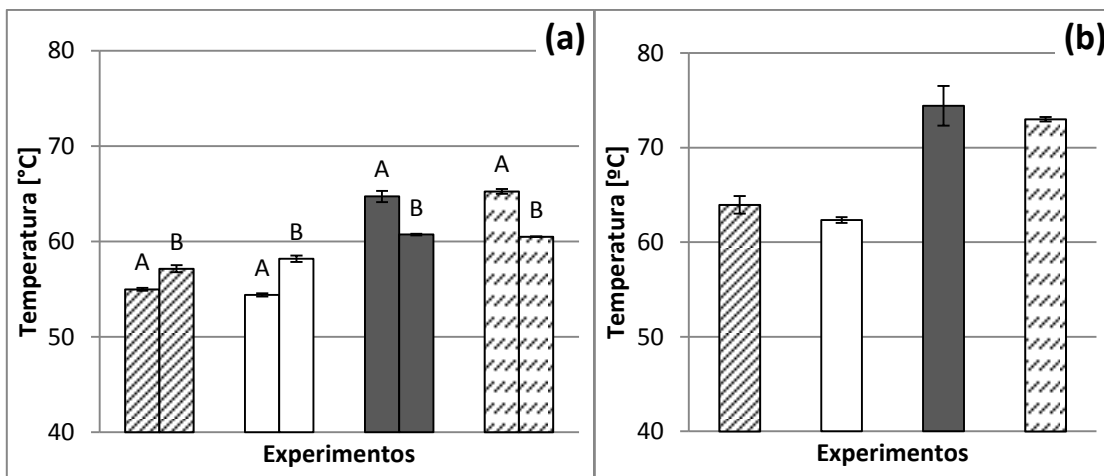
En la Figura 12 se presenta la energía necesaria para evaporar un kilogramo de agua de la solución a concentrar. Esta energía se calculó teniendo en cuenta solo el calor sensible cedido por el vapor (la temperatura de salida de vapor de calentamiento fue siempre superior a la temperatura de condensación) y el condensado de agua recuperado de la solución después de la concentración.

Los valores de energía para las pruebas a una concentración inicial de 10% evidencian una variabilidad significativa en los experimentos; por lo que no se puede establecer una tendencia sobre el flujo de energía con respecto a las condiciones de trabajo. Esta variabilidad se explica por el hecho que la mayoría de las prácticas se realizaron bajo control manual de vacío, afectando las temperaturas de ebullición entre el experimento original y su duplicado, y de ahí, la transferencia de energía. Sin embargo se puede decir que, de manera general, todos los experimentos guardan el mismo nivel de consumo de energía por kilogramo de agua evaporada (entre 3 y 8 Kcal/kg agua evaporada).



**Figura 12. Consumo de Energía evidenciado para las pruebas de evaporación de película ascendente.**

La Figura 13 muestra las temperaturas de ebullición promedio encontrados durante los experimentos (original y duplicado).



P 100mBar; T 105°C
  P 100mBar; T 115°C
  P 200mBar; T 105°C
  P 200mBar; T 115°C

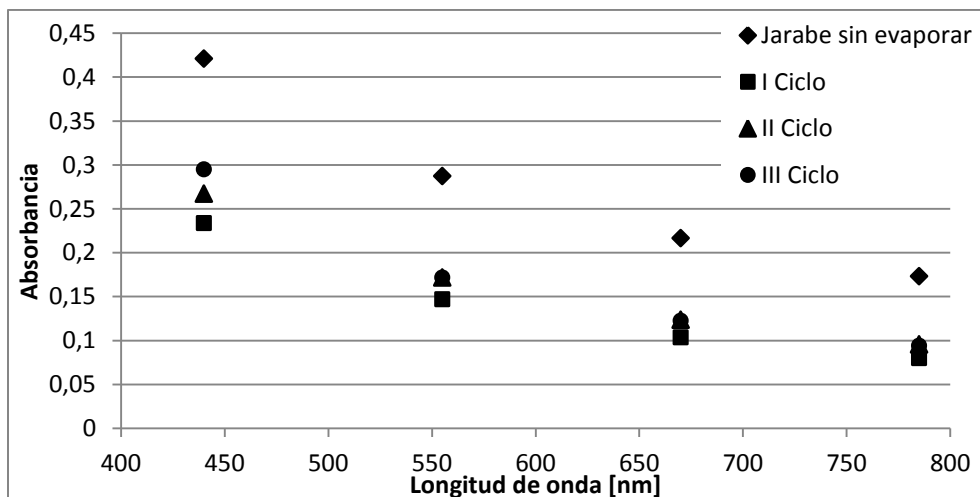
(A) Experimento original; (B) Repetición

**Figura 13. Temperatura de ebullición de la solución para las concentraciones iniciales de 10% w/w (a) y 40% w/w (b). A=original; B=duplicado.**

De ella se observa que la presión influye en la temperatura de ebullición. Fenómeno que encuentra su explicación en la modificación del equilibrio líquido-vapor; mayor vacío genera la disminución de la temperatura de ebullición<sup>[21][28]</sup>. Igualmente se observa que la concentración inicial influencia la temperatura de ebullición. Esto puede explicarse ya que al aumentar la concentración de sólidos disueltos en la solución, la presión de vapor disminuye (aumentando así su temperatura de ebullición)<sup>[23]</sup>.

### 5.2.1. Efecto del proceso de evaporación en película ascendente sobre la calidad del producto (análisis basado en el color del producto).

Para concentrar la solución de 20°Brix a 65,5 °Brix, la solución debió pasar por el evaporador tres veces (tres ciclos). En el primer ciclo la solución alcanzó una concentración de 34,5 °Brix, luego del segundo ciclo la concentración fue de 46,75 °Brix y finalmente con el tercer ciclo se alcanzó la concentración final de 65,5 °Brix. La Figura 14 muestra los valores de absorbancia en el espectro visible para el producto al final de cada ciclo (para su respectivo análisis todas las muestras fueron llevadas a una misma concentración diluyendo con agua).



**Figura 14. Valores de absorbancia en el espectro visible para el jarabe concentrado por evaporación de película ascendente a distintos niveles de concentración. Muestras diluidas hasta una concentración de 20,25°Brix.**

En la Figura 14 se observa una influencia de la evaporación sobre la absorbancia de la solución especialmente para la longitud de onda de 440nm, que corresponde al color azul. Esto se debe a que el color que se absorbe es el complementario del color que se transmite o refleja, que en este caso es el amarillo<sup>[29]</sup>. Se puede ver que para cada ciclo hay un incremento en el valor de la absorbancia, lo que indica un efecto (negativo) de la técnica de evaporación sobre el color del producto; luego sobre la calidad de éste.

Lo anterior se explica por el hecho de que un aumento en la concentración de la solución durante el proceso conlleva a una mayor viscosidad, lo que dificulta la fluidez de la película (ascendente); incrementando el tiempo de contacto de esta con la superficie caliente del evaporador; causando una elevación en el valor de la absorbancia en aproximadamente un 28%. Este aumento de la absorbancia está directamente relacionado con la composición de la solución.

El cambio de absorbancia entre el jarabe sin evaporar y el primer ciclo se puede explicar igualmente a un cambio de la composición del producto, ya que antes del ciclo el jarabe tenía una apariencia turbia y después de este se tornó traslúcido.

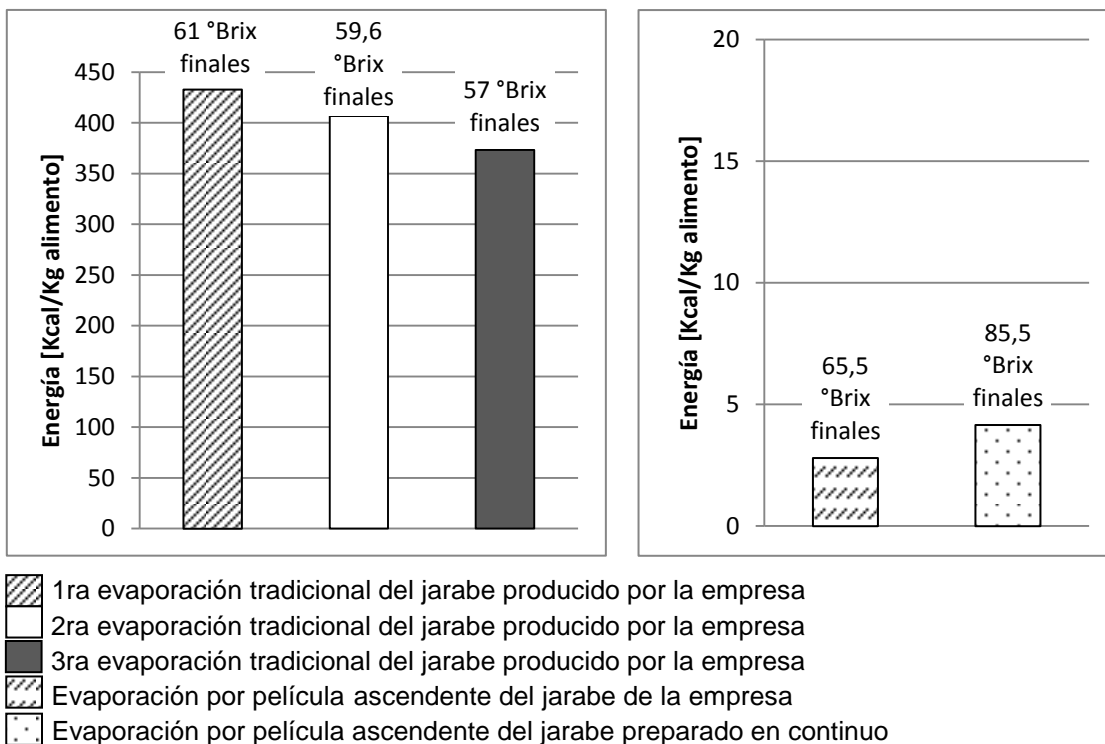
### **5.3. COMPARACIÓN DE LA TÉCNICA DE EVAPORACIÓN DE PELÍCULA ASCENDENTE RESPECTO A LA EVAPORACIÓN TRADICIONAL**

Esta sección busca, de forma general, comparar el método estudiado con respecto a la etapa de concentración tradicionalmente aplicada en la empresa Promitec Santander S.A.S. (evaporador enchaquetado de superficie raspada en vacío), en términos de consumo energético y de calidad.

#### **5.3.1. Consumo de energía.**

La Figura 15 muestra la comparación de la energía consumida en cada proceso por kilogramo de solución alimentada, para la evaporación tradicional al vacío (empresa) y el evaporador de película ascendente (estudiado). Como se observa en la gráfica, el proceso de evaporación tradicional se realizó tres veces partiendo de 20 °Brix hasta concentraciones finales de 61, 59,6 y 57 °Brix. Las diferencias en las energías se explican por diferencias en las concentraciones finales alcanzadas en cada experimento. Lo mismo sucede para los datos de energía del evaporador de película ascendente.

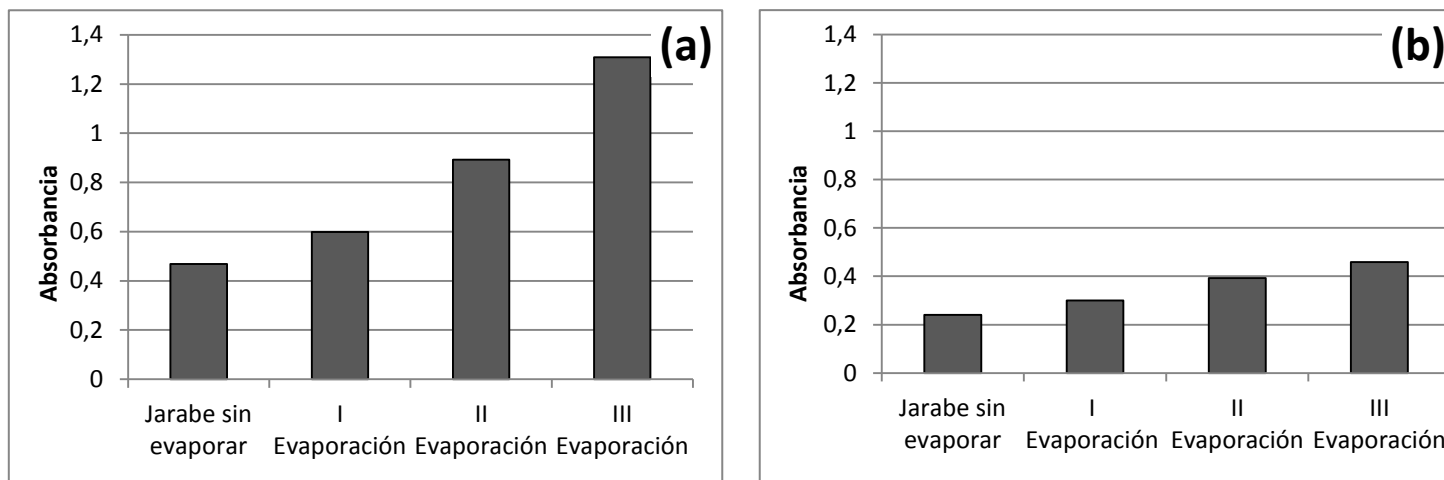
De la Figura 15 se observa que hay una diferencia significativa entre el método de evaporación tradicional empleado en la empresa y la evaporación por película ascendente, en donde el consumo energético para el primero es al menos 150 veces mayor que para el de película ascendente. Esto puede justificarse en dos puntos, baja eficiencia en la transferencia de energía (evaporador enchaquetado) y pérdidas de energía considerables (evaporador no aislado térmicamente) en el proceso utilizado tradicionalmente.



**Figura 15. Energía consumida por kilogramo de jarabe alimentado por el evaporador encaquetado (técnica utilizada por la empresa) y de evaporación de película ascendente.**

### 5.3.2. Efectos sobre la calidad del producto (análisis basado en el color del producto).

En la figura 16 se presentan los valores de absorbancia de 440 nm para un mismo jarabe concentrado y diluido tres veces consecutivas, por evaporación de película ascendente y evaporación tradicional (empresa). Las diluciones siempre se realizaron para llevar nuevamente la solución a una concentración inicial de 20 °Brix aproximadamente. Las muestras finales (a diferentes concentraciones) fueron analizadas por espectrofotometría a una misma concentración (61,25 °Brix para la evaporación de película ascendente y de 57 °Brix para la evaporación tradicional aplicada por la empresa); esto con el fin de que los resultados no se vieran afectados por la concentración.



**Figura 16. Valores detallados de absorbancia a 440 nm para el jarabe evaporado mediante evaporación de película ascendente, leídos a 61,25 °Brix (a) y evaporación tradicional leídos 57 °Brix (b).**

La tendencia general para las dos técnicas (Figura 16) es la de un aumento en la absorbancia a 440 nm; lo que evidencia la presencia de reacciones de caramelización con cada nueva evaporación (siendo más significativa para la evaporación en película ascendente). Esto se debe a que con este método, a medida que se concentra la solución, aumenta la viscosidad de esta, y con ello, la dificultad de la película a desplazarse fácil y rápidamente sobre la superficie caliente (que está a una temperatura cercana a la del vapor de calentamiento).

Sin embargo, se observa que para la primera evaporación el impacto sobre las absorbancias posee el mismo orden de magnitud (27,8% en el evaporador de película ascendente y 16,08% en el evaporador tradicional para la primera evaporación).

## 6. CONCLUSIONES

Se estableció la técnica de ósmosis inversa como un método de preconcentración de jarabes de glucosa. Con esta técnica se pudo retirar  $2/3$  del volumen de solución inicial ( $10^{\circ}\text{Brix}$ ) en corto tiempo (20 min); sin emplear temperaturas que afecten el producto e incrementando 2,5 veces la concentración. Una mayor presión transmembranaria y temperatura aumentarán el volumen de permeado, siendo la presión la más influyente, para este proceso.

Para la evaporación de película ascendente se observa que la tasa de concentración es la misma sin importar las diferentes condiciones de presión, temperatura y concentración de alimentación. Esto permite concluir que el proceso está determinado principalmente por las especificaciones de diseño del intercambiador de calor en el evaporador.

Al comparar el método de evaporación de película ascendente con el tradicional, se observó que el método tradicionalmente utilizado consume 150 veces más energía que el método estudiado; debido a su baja transferencia de energía. Por otro lado, la evaporación de película ascendente presenta un mayor impacto sobre la calidad del producto (color); debido a mayores tiempos de contacto con la superficie caliente; ocasionados por el aumento de la viscosidad de la solución y su dificultad para desplazarse sobre la superficie de intercambio. Este inconveniente podría disminuirse trabajando con la técnica de evaporación por película descendente.

## 7. TRABAJOS FUTUROS A CONSIDERAR

Se presentan dos posibilidades:

- Trabajar con la técnica de evaporación de película descendente, que por el principio mismo de su proceso, permitiría disminuir el impacto de evaporación sobre la calidad del producto; manteniendo los niveles de consumo energético presentados por la evaporación de película ascendente.
- Estudiar el método de caracterización de los jarabes de glucosa por espectrofotometría UV-Visible como estrategia para definir la calidad del producto.

## 8. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. POSITION OF THE AMERICAN Dietetic Association: Use of Nutritive and Nonnutritive Sweeteners. En: Journal of the American Dietetic Association, Vol. 104, No. 2 (February 2004); Pages 255-275.
2. COULSTON; JOHNSON. Sugar and sugars: myths and reality. En: Journal of the American Dietetic Association, Vol. 102, No. 3 (March 2002); Páginas 351-353.
3. BENJUMEA R.; CORREA G. Edulcorantes. Colombia hacia la promoción de la salud. Vol. 6, No. 1 (2001); páginas 33-46.
4. BERK, Z. Food process engineering and technology. Primera edición. Elsevier, 2009. Páginas 251, 425, 451.
5. BICHSEL, S.; SANDRE, A. Application of membrane technology to juice concentration, Int. Sugar J. 84 (1982); páginas 266–268.
6. HINKOVA; BUBNÍK; KADLEC; PRIDAL. Potentials of separation membranes in the sugar industry. Separation and Purification Technology. Vol. 26 (2002); Páginas 101–110.
7. LIPNIZKI. Membrane technology, Volume 3: membranes for food applications. Cross flow membrane application in the food industry. Willey-VCH, 2010. Página 1.
8. GOTTER; ESCOBAR; PEREZ. La yuca en el tercer milenio. El sector yuquero en Colombia: desarrollo y competitividad. Página 343.
9. MADAENI, ZERESHKI. Energy consumption for sugar manufacturing. Part I: Evaporation versus reverse ósmosis. Energy Conversion and Management. Vol. 51 (2010); Pages 1270–1276.
10. JESUS; LEITE; SILVA; MODESTA; MATTA; CABRAL. Orange (*Citrus sinensis*) juice concentration by reverse ósmosis. En: Journal of Food Engineering. Vol. 81 (2007); Páginas 287–291.

11. GURAK; CABRAL. Quality evaluation of grape juice concentrated by reverse ósmosis. En: Journal of Food Engineering. No. 96 (2010); Páginas 421–426
12. Evaporator Handbook.
13. WALTHER; WHITELAW. Factors affecting the performance of long tube climbing film evaporators. En: Congress of the South African Sugar Technologists Association. Vol. 70 (1996); Pages 221-224.
14. PACHECO, C.; FRIONI, L. Experimental results for evaporation of sucrose solution using a climbing/ falling film plate evaporator. En: Journal of Food Engineering. No. 64 (2004); Pags 471–480.
15. HOBBS, L. Sweeteners from Starch: Production, Properties and Uses. En: BEMILLER, J.; WHISTLER, R. Starch: Chemistry and Technology. 3ra Edición. Elsevier, 2009. Páginas 799, 821.
16. MERA; CARRERA. Obtención de glucosa a partir de almidón de yuca *Manihot sculenta*. Facultad de Ciencias Agropecuarias, Vol. 3, No.1 (Marzo 2005)
17. BRAUTLECHT, C. STARCH Its sources, production and uses. Reinhold Publishing Corporation, 1953. Páginas 1-18
18. PANTOH; LOW. Glucose syrup production from Indonesian palm and cassava starch. En: Food Research International, Vol. 28, No. 4 (1995); pages 379-385.
19. KEARSLEY, M.; DZIEDZIC, S. Handbook of starch hydrolysis products and their derivatives. Blackie Academic & Professional. 1995. Página 30
20. POTTER, N.; HOTCHKISS, J. Ciencia de los Alimentos. 5ª edición. ACRIBIA, 1995. páginas 255, 257-262.
21. SHARMA; MULVANEY; RIZVI. Ingeniería de alimentos: Operaciones unitarias y prácticas de laboratorio. Limusa Wiley, 2007. Pag 176
22. AL-HAWAJ, O. A study and comparison of plate and tubular evaporators. En: Desalination 125 (1999); páginas 233–242

23. IBARZ, A.; BARBOSA, C.; GARZA, S.; GIMENO, V. Métodos experimentales en la ingeniería alimentaria. ACRIBIA, 2000. Páginas 85, 88.
24. FELLOWS, P. Tecnología del Procesado de los Alimentos: Principios y Prácticas. ACRIBIA, 1994. Páginas 141-142.
25. BELITZ, H.; GROSH, W.; SCHIEBERLE, P. Food Chemistry. Cuarta edición. Springer, 2009. Página 270.
26. ALVES, D.; PRATES, M.; SANCHES, P. Spectrophotometric determination of the ASTM color of diesel oil. En: Fuel 86 (2007); páginas 911–914
27. PALUMBO, P.; WEBER, W. Novel spectrophotometer for the measurement of color and appearance. En: Analytica Chimica Acta 380 (1999); pgs 243-261
28. SMITH, J.M.; VAN NESS, H. C. Introducción a la Termodinámica en Ingeniería Química. 5ª edición. McGraw-hill, 1997. Capítulos 3 y 10.
29. ABRIL, N. Espectrofotetría: Espectros de absorción y cuantificación colorimétrica de biomoléculas. 8 páginas