

**EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE ULTRAFILTRACIÓN PARA EL
TRATAMIENTO DE ACEITE DE PALMA (*ELAEIS GUINEENSIS*) USADO EN
FRITURA**

**CATALINA BERNAL LÓPEZ
BEATRIZ GUEVARA GUERRERO**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS
SANTIAGO DE CALI, VALLE
AGOSTO DE 2011**

**EVALUACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE ULTRAFILTRACIÓN PARA EL
TRATAMIENTO DE ACEITE DE PALMA (*ELAEIS GUINEENSIS*) USADO EN
FRITURA**

**Trabajo de grado presentado para optar por el título de
Ingeniero de Alimentos**

Directora

AIDA RODRÍGUEZ DE STOUVENEL Ph.D

**CATALINA BERNAL LÓPEZ
BEATRIZ GUEVARA GUERRERO**

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA DE ALIMENTOS
SANTIAGO DE CALI, VALLE
AGOSTO DE 2011**

AIDA RODRÍGUEZ DE STOUVENEL Ph.D
Directora de trabajo de Grado

Santiago de Cali, Agosto de 2011

AGRADECIMIENTOS

Las autoras del presente trabajo de grado expresan sus más sinceros agradecimientos a Dios por su guía y fortaleza, y a todas aquellas personas que con su apoyo, guía y paciencia han contribuido al desarrollo del mismo.

En especial queremos agradecer a:

- Aida Rodríguez de Stouvenel, nuestra directora de tesis por la confianza depositada y guía durante el desarrollo del proyecto.
- Rigo Alberto Magon, Patricia Millan y Luz Karime Quintero, por su colaboración en la parte experimental de este proyecto.
- Ester Inés Orozco, por su disposición y cordialidad.
- La Escuela de Ingeniería de Alimentos de la Universidad del Valle, por la formación académica y personal recibida por parte de su grupo docente.
- Diego Tovar por su colaboración con la parte estadística de este proyecto

A MANERA PERSONAL CATALINA BERNAL AGRADECE A:

- *Mi madre Alba Lucia, hermanas Susan Andrea y Mónica Lucia y a Lola por su apoyo, amor y comprensión incondicional, porque siempre han sido mi guía, fortaleza y motivo de orgullo, durante todos los días de mi vida y de realización como profesional.*
- *John Provis*, por todas las enseñanzas y por hacer feliz a una de las personas más importantes para mí.
- *Harold David Ordoñez*, por su apoyo y afecto en el desarrollo de mi carrera.
- *A mi compañera en obra, Beatriz Guevara Guerrero*, por su afecto, amistad, comprensión, compañerismo y compromiso durante el desarrollo del proyecto y el transcurso de la carrera.

- *Todas aquellas personas que de alguna manera han contribuido a la culminación de esta etapa de mi vida.*

A MANERA PERSONAL BEATRIZ GUEVARA AGRADECE A:

- *A mis padres, Sidney y Yaneth, por orientarme, darme sus consejos y apoyo que siempre me han ayudado. Y por supuesto al resto de mi familia, mi hermana y mi abuela, mis tíos, primos,... por su confianza en mí.*
- *Miguel Enrique García, por su apoyo y afecto en el desarrollo de mi carrera.*
- *A mi compañera en obra, Catalina Bernal López, por su afecto, amistad, comprensión, compañerismo y compromiso durante el desarrollo del proyecto y el transcurso de la carrera.*
- *A todos mis compañeros y amigos, sobre todo Juan Carlos Montero, Delia, Jennifer, porque sin todos ustedes, sus consejos y ayuda, seguro que no estaría escribiendo estas líneas.*

TABLA DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	1
RESUMEN.....	1
1. INTRODUCCIÓN	3
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
3. JUSTIFICACION.....	7
4. OBJETIVOS	4.12
4.1. OBJETIVO GENERAL.....	4.1.12
4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	4.2.12
5. ESTADO DEL ARTE	13
5.1. Tecnología de Membranas	14
5.2. Funcionamiento de una planta de membranas	16
5.3. Clasificación de las tecnologías de membranas.....	17
5.4. Tipos de módulos.....	18
5.4.1. Tipos de membranas según el material.....	19
5.4.2. Aplicación de tecnología de membranas para la recuperación de aceites vegetales	20
5.5. Proceso de ultrafiltración	20
5.5.1. Parámetros operativos de la membrana.....	21
6. METODOLOGÍA	23
6.1. PROCEDIMIENTO	23
6.1.1. Selección de la Materia Prima.....	23
6.1.2. Pre-tratamiento	23
6.1.3 Ultrafiltración	24
6.2. ANALISIS FÍSICO-QUÍMICOS.....	25
6.3. DISEÑO EXPERIMENTAL – METODOLOGIA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA (M.S.R).....	26
7. ANALISIS Y RESULTADOS.....	28
7.1. pretratamiento.....	28

7.2. Tratamiento de Ultrafiltración.....	29
7.2.1. Efecto de la presión y la temperatura en el flux de permeado	29
7.2.2. Efecto de la presión y temperatura en la viscosidad	32
7.2.3. Efecto de la presión y la temperatura en la reducción de ácidos grasos libres	39
8. CONCLUSIONES	51
9. REFERENCIAS	52
ANEXOS	57

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros analíticos que marcan el límite de utilización de grasas y aceites en el proceso de fritura (<i>Firestone, 2004; NTC 3272, 1997</i>)	10
Tabla 2. Clasificación de tipos de membranas en función del tipo de partículas y sustancias retenidas (<i>Schirg. P, 2001</i>).....	17
Tabla 3. Los tipos y dimensiones de módulos más importantes usados en tecnologías de membranas (<i>Schirg. P, 2001</i>)	18
Tabla 4. Variables y niveles de variación usados en el diseño experimental.....	26
Tabla 5. Parámetros del diseño, con dos variables independientes con tres niveles y cinco repeticiones en el punto central.....	6.3.27
Tabla 6. Viscosidad del aceite de alimentación en función de la temperatura.....	35
Tabla 7. ANOVA de la viscosidad de aceites de fritura tratados por ultrafiltración ($R^2=0,7971$)	35
Tabla 8. ANOVA de la viscosidad de aceites de fritura tratados por ultrafiltración ($R^2=0,7882$)	36
Tabla 9. Índice de acidez del aceite de palma antes y después de un proceso de ultrafiltración	41
Tabla 10. ANOVA de la acidez expresada como ácido palmítico de aceites de fritura tratados por ultrafiltración ($R^2=0,8938$).....	43
Tabla 11. Correlación entre el índice de acidez y la humedad para muestras de aceite crudo y retenido.....	49

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estructura de la producción mundial de grasas y aceites (<i>FAS-USDA, 2010</i>).....	8
Figura 2. Principales productores de aceite de palma (<i>FAS – USDA, 2010</i>)	8
Figura 3. Producción de jugo de fruta con tecnología de membranas.....	15
Figura 4. Principio básico de una planta de membrana de presión simple en un proceso discontinuo (<i>Schirg. P, 2001</i>)	16
Figura 5. Módulos de membranas: (A) espiral, (<i>Baker R, 2004</i>); (B) tubular, (<i>Baker R, 2004</i>); y (C) capilar, (<i>Gruenwedel W. et al, 1987</i>)	19
Figura 6. Diagrama de flujo para el pre-tratamiento de los aceites de fritura y el proceso de UF.....	23
Figura 7. Modulo de ultrafiltración (Tomado de la Guia Pellicon)	24
Figura 8. Diagrama del sistema de ultrafiltración	25
Figura 9. Concentración de sólidos suspendidos totales en el pre-tratamiento del aceite de palma.....	28
Figura 10. Cambio del flujo de permeado en el tiempo a diferentes condiciones de operación.....	30
Figura 11. Cambios en el flux de permeado a diferentes presiones en función de la temperatura de filtrado.....	31
Figura 12. Reograma de un fluido newtoniano.....	33
Figura 13. Viscosidad de alimentación y retenido en función de la presión (A) y la temperatura (B).....	34
Figura 14. Gráfica de probabilidad normal de los residuales para modelo lineal	37
Figura 15. Gráfica de los residuales contra los valores ajustados para un modelo cuadrático	37
Figura 16. Contornos de viscosidad de un aceite de fritura en función de la temperatura de ultrafiltración	38
Figura 17. Superficie de respuesta para la viscosidad de un aceite de fritura en función de la temperatura.....	39

Figura 18. Gráfica de dispersión de la acidez, en función de la temperatura (A) y la presión (B).....	42
Figura 19. Gráfica de probabilidad normal de los residuales para la acidez usando un modelo cúbico.....	44
Figure 20. Gráfica de los residuales contra los valores ajustados para un modelo cúbico.....	44
Figura 21. Gráfica de contorno de la acidez de un aceite usado en función de la temperatura y presión	47
Figure 22. Gráfica de superficie de respuesta de la acidez de un aceite usado	47
Figura 23. Comparación de la humedad del flujo de alimentación (o), con el retenido a las condiciones de ultrafiltración evaluadas	48

RESUMEN

La producción de aceites comestibles involucra el empleo de solventes orgánicos como hexano para la formación de micelas. Posteriormente estos disolventes son removidos y se obtienen aceites crudos con impurezas lo cual causa un efecto negativo en la calidad del producto final. Convencionalmente, estas impurezas son removidas e involucran etapas tales como neutralización, desgomado, desodorización, entre otros, dependiendo del tipo de refinación que se esté siguiendo. Procesos similares son usados en la recuperación de aceites de fritura en su adecuación para ser reutilizados como materias primas en diferentes aplicaciones.

En años recientes la tecnología de membranas surge como una nueva alternativa en comparación con procesos convencionales de refinación de aceites involucrando un menor número de pasos, que puede realizarse a condiciones de temperatura ambiente, garantizando de manera satisfactoria la reducción de ácidos grasos libres y la remoción del agua presente en aceites crudos/usados como resultado del prolongado calentamiento al que es sometido durante el proceso de fritura y la transferencia de masa que se presenta cuando el aceite tiene contacto con el alimento.

El objetivo de este proyecto, fue estudiar la efectividad de la ultrafiltración en la remoción de impurezas y agua presentes en la oleína de palma usado en fritura de plátano. Inicialmente se realizó un proceso de filtración al vacío para la reducción de la cantidad de sólidos suspendidos en el aceite. El aceite clarificado (Tamaño de partícula < 20 – 25 μm) fue sometido al proceso de ultrafiltración variando la temperatura (30, 35, 40, 45 y 50°C) y la presión (7.5, 8.75, 10, 11.25, 12.5 psi) de operación.

La efectividad de la ultrafiltración en términos de la reducción de ácidos grasos libres y de agua en el aceite fue determinada a través de pruebas de índice de acidez, viscosidad y humedad. Los resultados obtenidos en este proyecto revelan de manera preliminar que la tecnología de ultrafiltración aplicada a aceites usados, puede ser empleada como una alternativa tecnológica para obtener resultados similares a los

encontrados en procesos tradicionales, a un menor costo y con menor impacto ambiental.

1. INTRODUCCIÓN

En Colombia los aceites comestibles son producidos a partir de materia vegetal, cuya obtención se lleva a cabo principalmente a partir de cuatro tipos de cultivos: palma, soya, ajonjolí y algodón. El cultivo de aceite de palma es el de mayor importancia en el país en términos de área, producción y rendimiento, motivos por los cuales es utilizado en gran medida a nivel industrial. Éste es el único de los materiales oleaginosos que no ha reportado una reducción de producción en el país durante los últimos años y por el contrario, se ha identificado una tendencia creciente con el tiempo, cuya producción en el año 2009 fue de 770 mil toneladas, mientras que para el 2010 esta se estimó en 820 mil toneladas (*FAS-USDA, 2010*). Sin embargo, la mayor producción de aceite de palma a nivel mundial proviene principalmente de Malasia e Indonesia, los cuales producen el 87% del total de aceite y el 13% restante proviene de países como Nigeria, Colombia, Tailandia, Nueva Guinea y Ecuador (*Gunstone F, 2010*).

Los aceites más utilizados en el consumo doméstico para la elaboración de productos fritos son el aceite de girasol y de soya. El aumento en el consumo de esta materia prima está asociado directamente con el crecimiento, en Colombia y en el mundo, del mercado de la industria de las comidas rápidas y los aperitivos (*nombre en inglés "snacks"*). Sin embargo las transformaciones del aceite que tienen lugar durante el proceso de fritura en la preparación de alimentos, no permiten que éste sea reutilizable en estos procesos, lo cual restringe su uso a un corto periodo de vida, convirtiéndose en un residuo, el cual se emplea en la producción de jabones, biocombustibles, lubricantes, fabricación de ceras, pinturas, entre otras (*Bailey A., 1984*).

Para la reutilización del aceite residual de fritura, como materia prima para diferentes industrias este requiere un tratamiento previo de separación y remoción de las partículas sólidas que provienen del alimento frito, las cuales varían en tamaño, composición y en el grado de deterioro, siendo ello dependiente del tipo de alimento que se preparó con el aceite a recuperar. Los procesos convencionales para la adecuación de aceites de fritura involucran la utilización de metanol, etanol, hidróxido de sodio, entre otros

productos químicos para su transformación y están generalmente asociados con una baja sostenibilidad ambiental. Por otra parte, los aceites que han sido sometidos a procesos de fritura, están expuestos a la acción de cuatro agentes que provocan cambios drásticos en su estructura como: 1. Humedad de los alimentos (Hidrólisis), 2. Oxígeno de la atmósfera (provocando alteración oxidativa), 3. Las altas temperaturas de operación (Termoxidación) y 4. Contaminación por los ingredientes de los alimentos (Moreira R.G. *et al*, 1999).

En la actualidad las alteraciones ocasionadas por el oxígeno son controladas con el uso de freidoras al vacío, sin embargo debido al diseño de este equipo, el agua evaporada del alimento no puede escapar en su totalidad del interior del recipiente retornando al aceite, aumentando la presión interna (por lo que el aceite debe ser cambiado cada determinado período de tiempo) y el contenido de humedad en el aceite.

En la actualidad la eliminación de agua en aceites deteriorados se realiza a través de procesos de evaporación (Ma A.N., 2000) los cuales presentan altos requerimientos de energía, incrementando los costos del proceso de recuperación del aceite.

Diversas técnicas de separación han sido aplicadas en la tecnología de alimentos para la recuperación de aceites. Una de las restricciones de los procesos convencionales de separación es que se limitan a capturar las partículas de mayor tamaño, lo que sugiere que partículas de tamaños reducidos seguirán presentes en el aceite de fritura, reduciendo su calidad como materia prima para su aprovechamiento en diferentes procesos. Esto plantea la necesidad de la aplicación de técnicas más avanzadas de separación tal como la técnica de ultrafiltración (UF), para la posterior remoción de aquellas partículas con un tamaño medio $0.1 - 0.001 \mu m$. Esta técnica ofrece ventajas tecnológicas y ambientales relacionadas con bajos requerimientos de energía haciéndola una tecnología atractiva que permite realizar procesos de separación a bajas temperaturas, para evitar alteraciones térmicas, oxidativas o hidrolíticas que aceleran el deterioro de los componentes pertenecientes a los productos tratados (Lin L *et al*. 2005) y que adicionalmente permite una efectiva separación de aceite-agua, eliminando el proceso de evaporación necesario para evitar la hidrólisis del aceite recuperado.

El propósito de este trabajo de grado fue evaluar la efectividad del proceso de ultrafiltración en la remoción de las partículas de agua y de ácidos grasos libres, que deterioran la oleína de palma usada.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los efluentes de aceites se han convertido en un problema actual donde un litro de aceite puede llegar a contaminar aproximadamente 1000 litros de agua (*Londoño Arango J., 2008*), por lo que no debe ser vertida en las alcantarillas; por otra parte en Colombia la recuperación de oleína de palma usada se realiza a través de procesos convencionales, los cuales se asocian a una baja sostenibilidad ambiental por la utilización de solventes químicos y altos consumos energéticos.

La recuperación de solventes en el reacondicionamiento químico de aceites usados se ha convertido en uno de los pasos más importantes de la recuperación de aceites para el desarrollo económico y seguridad ambiental. En Estados Unidos se ha estimado que alrededor de $2,1 \cdot 10^{12}$ kJ / año se podrían economizar con el uso de un sistema basado en separación por membranas (*Koseoglu S.S. et al, 1990*).

Esto genera la necesidad de estudiar alternativas tecnológicas más limpias para la adecuación de estos aceites, tanto para la extensión de su vida útil, como para su reutilización como materia prima en otros procesos industriales, con un bajo consumo energético, bajas temperaturas de procesos y retención de compuestos deseables.

En ello radica la importancia de evaluar la efectividad de la ultrafiltración en la eliminación del contenido de agua del aceite y la reducción del contenido de ácidos grasos libres, formados en el aceite de oleína de palma usado al ser sometido a elevadas temperaturas durante la fritura.

3. JUSTIFICACION

Los países desarrollados y los países en desarrollo son exportadores de 3 y 4 millones de toneladas respectivamente de oleaginosas, siendo estos últimos los productores del 65% a nivel mundial (FAO, 2009), lo que demuestra la gran demanda de aceites vegetales. Estos son utilizados hoy en día en la elaboración de muchos productos fritos, tales como platanitos, papas fritas, yuca frita entre otros, debido a las características organolépticas tales como sabor, textura, color, que este proceso le aporta al producto.

La palma de aceite es un cultivo que a lo largo del tiempo ha tomado importancia por su alto potencial productivo, ya que presenta un rendimiento por hectárea de 3.7 toneladas, por lo que esta supera a oleaginosas tradicionales como la soya, canola, girasol y algodón. En la última década, el aceite obtenido de las plantaciones de la palma de aceite se ha consolidado como el primero del mundo en términos de producción, seguido del aceite de soya y de colza (Figura 1). El consumo de los principales aceites vegetales a nivel mundial se estima en aproximadamente 146.01 mil toneladas para el 2010, de los cuales el aceite de palma corresponde a un equivalente del 33% del total, por lo que permite elucidar que el aceite de palma es uno de los más consumidos a nivel mundial, principalmente en países como la India, China, Indonesia, Pakistán, Tailandia, Colombia entre otros (FAS – USDA, 2010).

Los principales productores de aceite de palma son Malasia e Indonesia, consolidándose como pioneros en el aprovechamiento del cultivo de palma de aceite, cuya producción total para el año 2010, fue de 47,912 millones de toneladas (Figura 2).

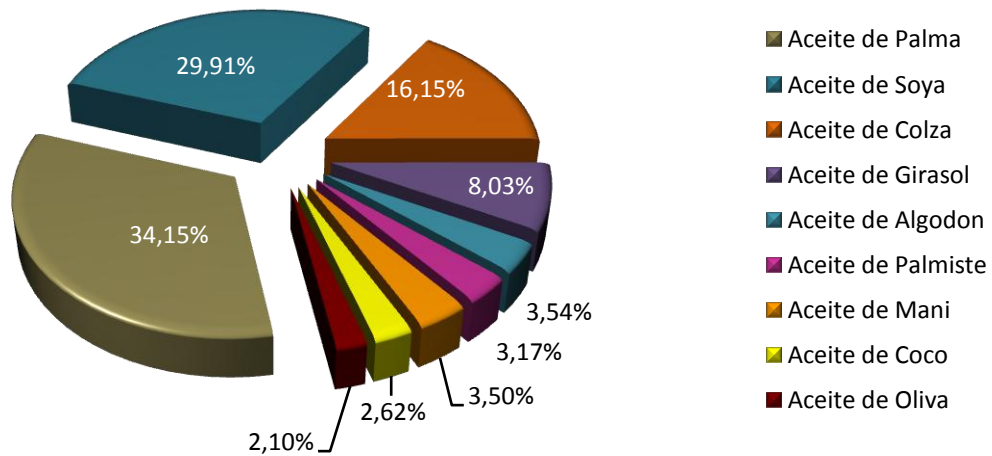


Figura 1. Estructura de la producción mundial de grasas y aceites (FAS-USDA, 2010)

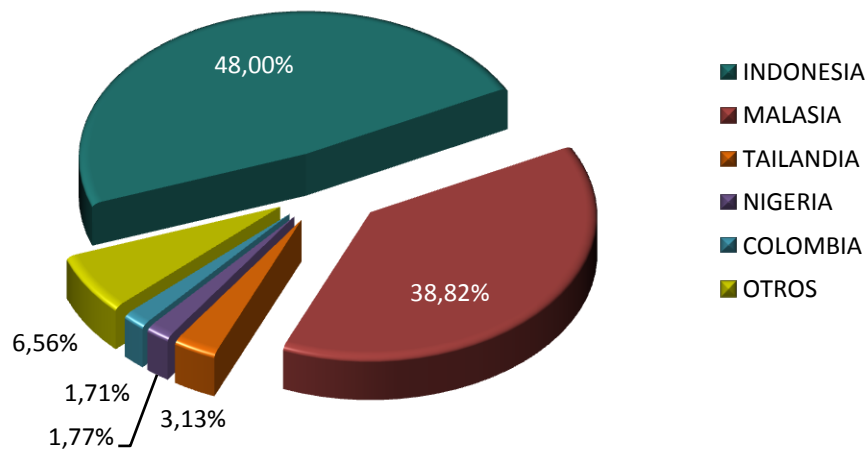


Figura 2. Principales productores de aceite de palma (FAS – USDA, 2010)

La importancia del estudio del aceite de palma, radica en que es una fuente importante de antioxidantes naturales como los tocofenoles, tocotrienoles y carotenos, los cuales actúan como protectores contra el envejecimiento celular, la arteriosclerosis, el cáncer y algunas enfermedades neurodegenerativas como el Alzheimer (Dadán S, 2010)

En la actualidad se realizan múltiples estudios sobre los efectos del consumo de aceite de palma en la salud humana, principalmente relacionados en el perfil lipídico, retinol sérico (vitamina A), ya que dietas ricas en ácidos grasos monoinsaturados ayudan a reducir el colesterol sanguíneo, disminuyendo uno de los principales factores de riesgo en enfermedades coronarias.

La oleína de palma por su parte contiene mezclas de ácidos grasos poliinsaturados, monoinsaturados y saturados, siendo la mayor fuente de carotenoides que inhiben efectivamente algunos tipos de cáncer, reduce la oxidación de las LDL, aumenta los niveles de retinol sanguíneo y previene la formación de trombos.

Es empleada en procesos de fritura, debido a la gran estabilidad que presenta a altas temperaturas, tiene menos tendencia a hacer humo o formar polímeros pegajosos insalubres y conserva las propiedades organolépticas del alimento, debido al suave sabor que éste presenta (*Malaysian Palm Oil Council, 2009*).

Estudios han demostrado que la oleína de palma, es un buen auxiliar para mezclarse con otros aceites vegetales y grasas, debido a que es estable frente a la rancidez y oxidación, proporcionando deseables propiedades nutricionales y fisicoquímicas, desarrollando alimentos más seguros para los consumidores, garantizando la calidad final del producto (*Mobin Siddique B. et al, 2010*).

Sin embargo durante la fritura el producto absorbe una elevada cantidad de grasa del medio de fritura y acumula compuestos alterados provenientes de la hidrólisis del aceite a causa de la humedad, de la oxidación debida al oxígeno del aire y de la polimerización térmica debido a las altas temperaturas utilizadas durante este proceso, deteriorándolo; Es por ello que en la actualidad se emplean técnicas que permiten la recuperación de aceites usados para obtención de biodiesel y glicerina (*Fedepalma, 2009*) a partir de tratamientos enzimáticos, (por medio de los cuales se adquieren compuestos de alto valor agregado, como surfactantes, a partir de aceites vegetales de bajo costo), procesos de sedimentación, tamizado, adsorción/absorción y centrifugación (*Blumenthal M.M, 1996*).

Dadas las implicaciones higiénico-sanitarias, los organismos internacionales y la administración de los diferentes países han dictado recomendaciones y disposiciones legales, que regulan la utilización y vida máxima de los aceites y grasas sometidos a fritura (Firestone, 1996; Clark et al, 1991). El sistema más aceptado para el control es el parámetro denominado porcentaje de compuestos polares totales (Debe ser < 24% en Alemania, < 25% en España, Bélgica, República Checa, Hungría, Francia e Italia; < 27% en Holanda, Suiza y Austria)

Además la legislación de algunos países marca también valores límite para otros parámetros complementarios (Tabla 1), siendo los más relevantes el grado de acidez y el punto de humo.

Tabla 1. Parámetros analíticos que marcan el límite de utilización de grasas y aceites en el proceso de fritura (Firestone, 2004; NTC 3272, 1997)

País	Acidez	Punto Humo	Temperatura de Fritura (máx)
Austria	<2,5	≤ 170	180 °C
Alemania	-	≤ 170	170 °C
Bélgica	<2,5	≤ 170	180 °C
Colombia	<0,1	≤ 220	-

La legislación colombiana para la reutilización de aceites en procesos de fritura y por consiguiente, para la prolongación de la calidad de éstos, permite la mezcla de aceites y grasas rancias a aceites crudos en un porcentaje no mayor del 25 por ciento del total de los compuestos polares presentes en éstas (Gertz.Ch 1986).

En este estudio se empleó la ultrafiltración (UF), con el propósito de disminuir la concentración de ácidos grasos libres que promueven el desarrollo de sabores desagradables, lo cual afecta la calidad del aceite de fritura e influye de manera directa en la calidad en los productos fritos. Específicamente, el proceso de ultrafiltración se considera más eficiente y rentable que procesos de filtración convencionales, debido a las grandes ventajas que conlleva su utilización por su bajo consumo de energía, el no

requerimiento de la adición de sustancias químicas y las bajas temperaturas a las cuales se lleva a cabo este proceso (*Subramanian R. et al, 2001*).

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar la tecnología de ultrafiltración (UF) en la adecuación de aceite de palma (*Elaeis guineensis*) usado en fritura.

4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Evaluar el efecto de las variables (temperatura y presión transmembrana) de operación en un sistema de ultrafiltración con membranas a escala de laboratorio.
- Caracterización físico-química (Análisis de índice de acidez, viscosidad y contenido de humedad) del aceite de fritura con miras a establecer la calidad del aceite luego de ser sometido al proceso de separación por ultrafiltración con membranas.

5. ESTADO DEL ARTE

Los aceites vegetales son alimentos fundamentales en la dieta alimenticia, que además de constituir la principal fuente de energía para el organismo, aportar elementos indispensables como vitaminas liposolubles y ácidos grasos esenciales, es el responsable de la palatabilidad y aroma de los alimentos que han sido sometidos a procesos de fritura (*Ruiz-Méndez, 1993*). El crecimiento de los diferentes sectores de consumo de aceite en los últimos años se debe a la modificación de los hábitos alimentarios en países industrializados (*Pozo-Diez, 1994*). La principal razón por la cual se destaca la fritura, es que durante este proceso se produce un intercambio de compuestos lipídicos entre el alimento y el aceite, modificando tanto las propiedades nutricionales y físico-químicas del aceite como las organolépticas deseables entre las cuales se encuentran el color, el sabor y el olor en el producto final (*Rosell J, 1998*). Adicionalmente, el aceite en el proceso de fritura actúa como un medio de transferencia de calor reutilizable que resulta ser más eficiente que otros procesos como el horneado y el cocimiento en agua. Las altas temperaturas que se alcanzan durante un proceso de fritura (180°C aproximadamente) producen una penetración acelerada de calor, llevando a una elaboración rápida de los alimentos, algo sumamente necesario en estos procesos (*Pérez-Camino, 1986*).

Como consecuencia de las altas temperaturas asociadas a los procesos de fritura, los aceites vegetales sufren tres complejos procesos de degradación: hidrólisis, oxidación y polimerización. Inicialmente tiene lugar la formación de diglicéridos (DG), monoglicéridos (MG), ácidos grasos libres y en algunos casos extremos glicerol, debido a la descomposición que sufren los triglicéridos (TG) cuando están en contacto con agua (*Fritsch C.W, 1981*). Posteriormente, las reacciones de oxidación no enzimática generan peróxidos por las altas temperaturas y la presencia de oxígeno e incidencia de la luz a las que el aceite es sometido. Finalmente se producen los radicales libres a causa del proceso de hidrólisis y oxidación que se mezclan con ácidos grasos y dan lugar a polímeros. Los anteriores procesos de degradación conllevan a la formación de sabores extraños, pérdida de valor nutritivo y acumulación de compuestos resultantes del

deterioro oxidativo de los ácidos grasos (*Chang S. et al, 1978*), constituyéndose en una amenaza a la salud pública, por la inadecuada manipulación de los alimentos que promueven a las ETAS (enfermedades transmitidas por alimentos), ya que estudios previos han demostrado la presencia de partículas cancerígenas en aceites deteriorados (*Gata et al, 1997*).

5.1. TECNOLOGÍA DE MEMBRANAS

La tecnología de separación de membranas es una nueva y novedosa operación de ingeniería de procesos. Tuvo sus principios en el año de 1745 cuando *Abbe Nollet* introdujo el término “ósmosis”, asociado ello a la separación de una molécula de agua a través de una membrana semipermeable (*Lonsdale, 1982*). En años posteriores, Graham, Fick y Schmidt, llevaron a cabo experimentos de difusión con membranas a través de los cuales reconocieron que era posible separar componentes según su peso molecular (*Shirg, 2001*). El gran desarrollo de las membranas se produjo un siglo después de Nollet en los años 1950 y 1960 con la revolución de producción de polímeros sintéticos con una elevada resistencia a compuestos químicos.

En años recientes, las membranas han sido ampliamente utilizadas en diferentes campos de aplicación tales como biotecnología, hemodiálisis, industrias de semiconductores, así como en la industria alimentaria (*Lipnizki F, 2010*). En esta última haciendo especial énfasis en la purificación de geles, purificación de aceites, microfiltración de leche, concentración de suero, elaboración de vino, producción de caña de azúcar, concentración de zumos de frutas (*Figura 3*).

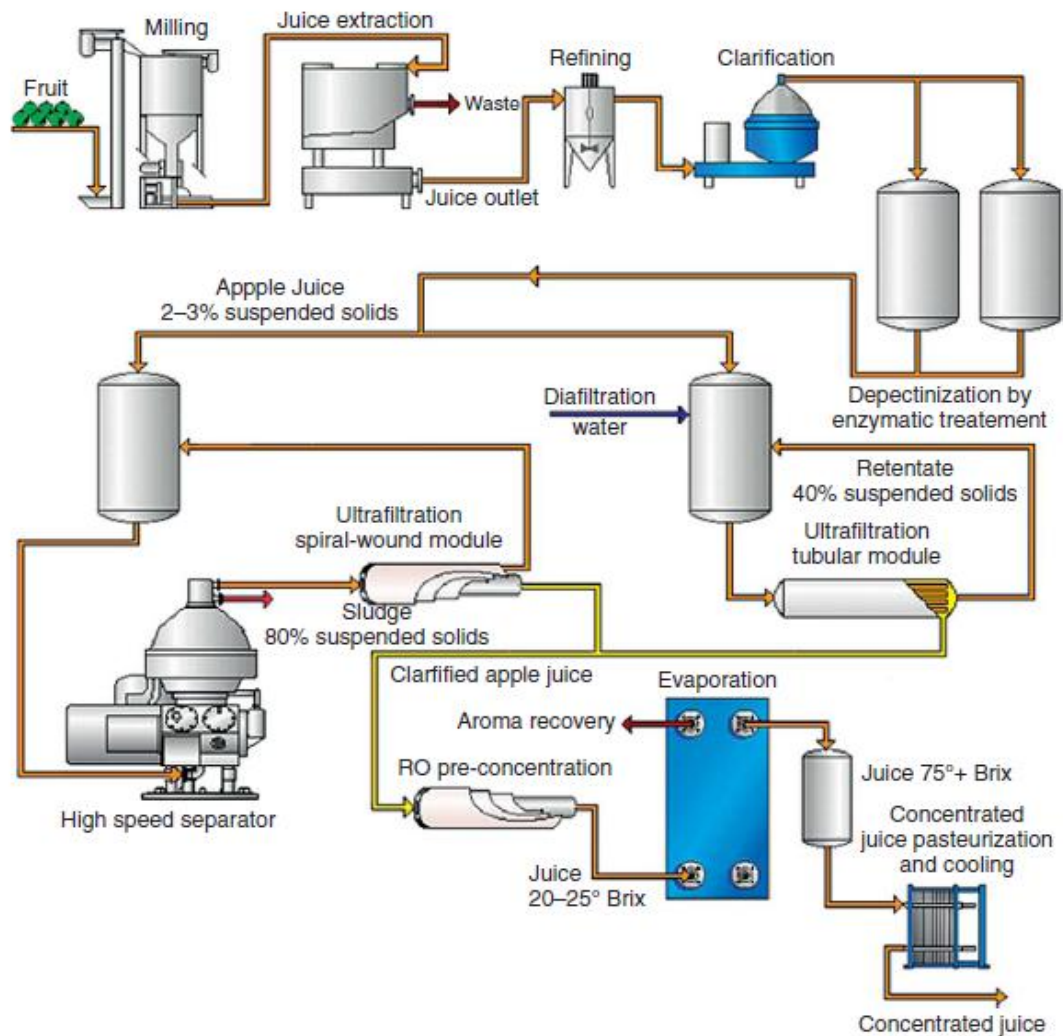


Figura 3. Producción de jugo de fruta con tecnología de membranas (*Lipnizki F, 2010*)

Para el procesamiento de jugos, la tecnología de membranas se ha establecido como parte del proceso de producción a partir de la década de 1970, por lo que existen grandes oportunidades en la actualidad para la producción de jugos de fruta natural como el jugo de manzana y naranja (*Lipnizki F, 2010*).

5.2. FUNCIONAMIENTO DE UNA PLANTA DE MEMBRANAS

Esta operación unitaria existe para la mayoría de los procesos de separación de líquidos encontrados en la industria alimentaria.

Los procesos de membranas usados con más frecuencia son microfiltración (MF), ultrafiltración (UF), nanofiltración (NF) y ósmosis inversa (OI). La Ultrafiltración y Microfiltración separan solutos y partículas coloidales de tamaño de aproximadamente 1 a 100 nm y de 0,1 a 10 μm respectivamente, usando una diferencia de presión de 100 a 500 KPa, como fuerza impulsora (Bowen R. et al, 1995).

Todos estos procesos son impulsados por una fuerza directora (Diferencial de presión) proporcionada por una bomba. Comúnmente se emplean procesos discontinuos (Figura 4) los cuales constan de un módulo de membrana, un recipiente alimentador, bomba y válvulas de presión (Schirg. P, 2001).

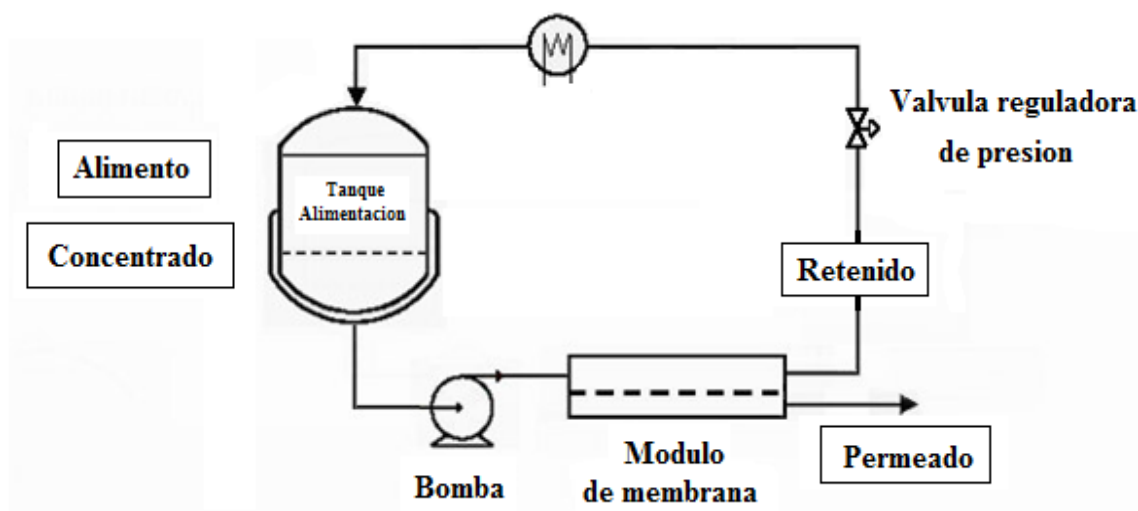
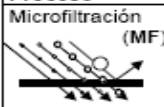
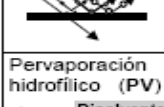
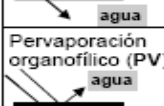
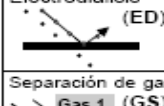
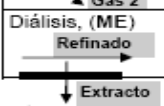


Figura 4. Principio básico de una planta de membrana de presión simple en un proceso discontinuo (Schirg. P, 2001)

5.3. CLASIFICACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE MEMBRANAS

En la tabla 2 se muestran los diferentes tipos de membranas en función de la fuerza impulsora, asociada a presiones entre 0,1 bar hasta 80 bar, el tipo de partículas y sustancias retenidas. De esta clasificación cabe resaltar que las membranas de ultrafiltración son ideales para la retención de partículas y macromoléculas tales como las presentes en aceites usados en procesos de fritura, los cuales son objeto de estudio del presente proyecto.

Tabla 2. Clasificación de tipos de membranas en función del tipo de partículas y sustancias retenidas (Schirg. P, 2001)

Proceso	Fuerza directora	Retenido	Permeado	Ejemplos de aplicación
 Microfiltración (MF)	Diferencia de presión 0.1 - 5 bar	Partículas	Disolventes, Componentes diluidos	Lavado de pigmentos; Limpieza y reciclaje de agua-jabón; Separación aceite/agua de emulsiones; Combinación de extracción de sólidos y filtración
 Ultrafiltración (UF)	Diferencia de presión 1 - 10 bar	Partículas, Macromoléculas	Disolventes, Componentes diluidos con masa molecular pequeña, Iones	Concentración y limpieza de productos biotecnológicos; Concentración de albúmina, gelatina, suero
 Nanofiltración (NF)	Diferencia de presión 10 - 40 bar	Partículas, Sustancias diluidas, Iones polivalentes	Disolventes, Componentes diluidos con masa molecular muy pequeña, Iones monovalentes.	Limpieza, Desalinización y Concentración de productos como : Colorantes, prod. químicos, prod. farmacéuticos; Concentración, reciclaje y limpieza de aguas residuales
 Ósmosis inversa (OI)	Diferencia de presión bis 10 - 200 bar	Partículas y todos los componentes diluidos	Solamente disolventes (agua, MeOH, EtOH)	Desalinización de agua de mar; Limpieza de aguas residuales; Reciclaje de productos; Concentración de productos
 Pervaporación hidrofílica (PV)	Diferencia de presión parcial (parte de permeado vacío 10 - 100 mbar)	Disolventes y Sustancias contenidas	Agua	(Azeotropos) Deshidratación por ej. ésteres, cetonas, alcoholes, ácidos orgánicos, Dioxan
 Pervaporación organofílica (PV)	Diferencia de presión parcial (parte de permeado vacío 1 - 100 mbar)	Agua y Sustancias contenidas	Disolventes	Recuperación de disolventes Limpieza de aguas residuales por ej. éster, cetonas, alcoholes, hidrocarburos clorados
 Electrodialisis (ED)	Potencial eléctrico aprox. 1 V/celula	Sustancias no cargadas	Iones	Desalinización, reacciones electroquímicas, obtención de ácidos/bases proveniente de sales
 Separación de gas (GS)	Dif. de presión hasta 80 bar, parte permeado en vacío	Gas 1 o gas inerte	Gas 2 o gas inerte	Separación : Nitrógeno/oxígeno Recuperación de disolventes provenientes de aire de salida
 Diálisis (ME)	Diferencia de concentración	Macro-moléculas, Partículas	Suciedades Mw < 1000	Hemodiálisis extracción por membrana

5.4. TIPOS DE MÓDULOS

En la actualidad se busca que la membrana tenga una capa delgada, ya que permite el manejo de bajas presiones para su funcionamiento, teniendo en consideración el tipo de módulo y el campo típico de la aplicación de la membrana a usar (microfiltración, ultrafiltración, ósmosis inversa, entre otros). Los módulos principalmente se clasifican por la forma de la membrana en dos grupos: los de *membrana tubular* y los de *membrana plana*. Las especificaciones de los principales módulos se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Los tipos y dimensiones de módulos más importantes usados en tecnologías de membranas (Schirg. P, 2001)

<i>Módulos : Membrana tubular</i>	<i>Módulos : Membrana plana</i>
Tubular (6-25 mm)	Placa y bastidor
Capilar (0.5-6 mm)	Enrollamiento espiral
Fibra hueca(0.04-0.5 mm)	Disco rotativo y cilindro

La elección de los módulos con dimensiones específicas depende adicionalmente de la forma, las ventajas y desventajas que estén presentes en una aplicación determinada. Algunas geometrías de los módulos usados en procesos de separación con membranas se muestran en la Figura 5.

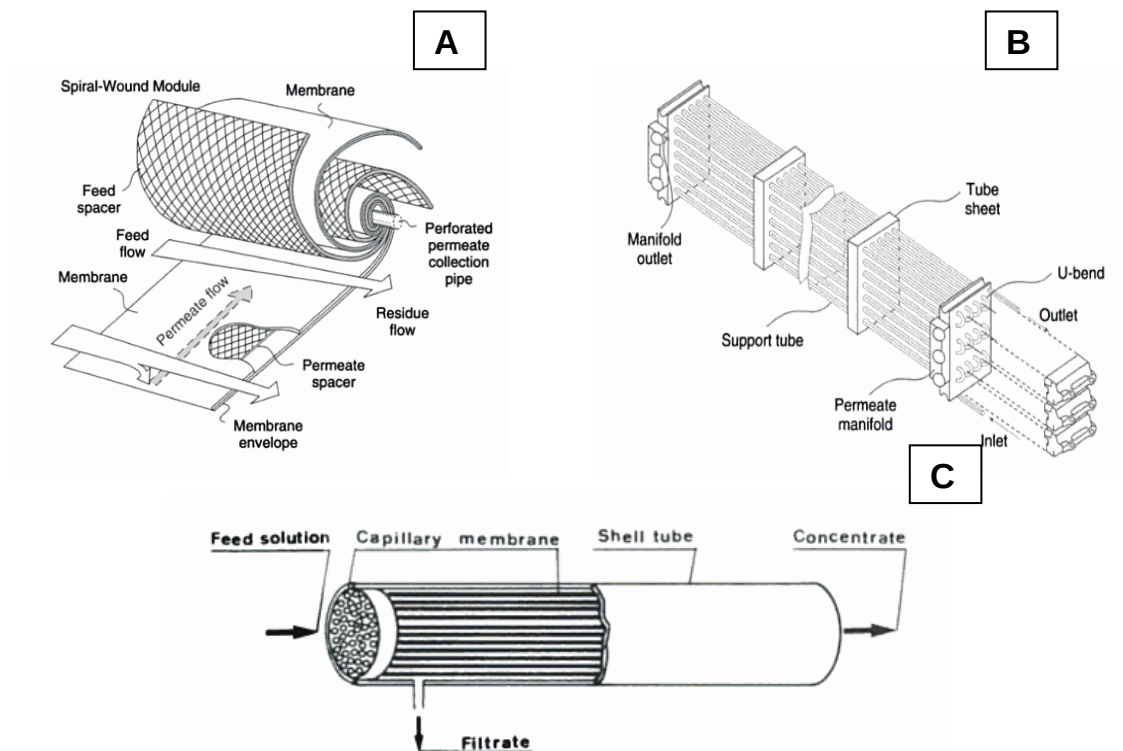


Figura 5. Módulos de membranas: (A) espiral, (Baker R, 2004); (B) tubular, (Baker R, 2004); y (C) capilar, (Gruenwedel W. et al, 1987)

5.4.1. Tipos de membranas según el material

Las membranas sintéticas comerciales son producidas a partir de dos clases de material: compuestos orgánicos (poliméricos) tales como acetato de celulosa (CA), poliamida (PA), polisulfona (PS) y difluoruro de polivinilideno (PVDF) entre otros; y compuestos inorgánicos tales como materiales metálicos y cerámicos (Cuperus & Nijhuis, 1993). Las propiedades físico-químicas de las materias primas a partir de las cuales se elaboran las membranas tienen una fuerte influencia en las propiedades del producto final, fundamentalmente en la consistencia química y térmica, flujo de permeado y respaldo e interacción con la alimentación (Schirg. P, 2001).

5.4.2. Aplicación de tecnología de membranas para la recuperación de aceites vegetales

Una alternativa para la recuperación de los aceites que han sido sometidos a procesos de fritura, es el proceso de tecnología de membrana, el cual incrementa la vida útil de estos, ya que retiene compuestos que conducen a la degradación de los aceites y además ofrece ventajas sobre los procesos convencionales (sedimentación, centrifugación, adsorción/absorción, tamizado) como bajo consumo de energía, operaciones a temperatura ambiente, no se adicionan químicos que incrementan los costos (Cheryan M, 1994), no se retienen nutrientes ni otros compuestos deseables (Subramanian R, 2000). Es por ello que la tecnología de membranas es una solución rentable y eficaz para las industrias de productos fritos porque aprovecha las diferentes propiedades físicas y químicas a nivel molecular del aceite, entre varios componentes en la corriente de alimentación en la refinería de aceite (Cheryan M, 1994).

5.5. PROCESO DE ULTRAFILTRACIÓN

El proceso de ultrafiltración consiste en hacer fluir el aceite deteriorado a través de la placa de membrana a partir de un gradiente de presión producido por una bomba. Al pasar esta solución a través del tamiz molecular se retienen las partículas que degradan el aceite, peróxidos, cetonas, aldehídos y de esta forma se separan los ésteres de glicerol de los compuestos de deterioro (Blumental. M, 1994). Los principales factores que intervienen en el proceso de ultrafiltración que involucra el uso de membranas son: la presión transmembrana aplicada, el flujo de alimentación, la concentración del alimento, y la temperatura.

La ultrafiltración retiene macromoléculas por el principio de diferencia de presiones; opera generalmente a nivel molecular con umbrales de separación del orden de pesos moleculares entre 500 – 500000 Daltons, lo que permite el paso a través del permeado de especies con bajo peso molecular como azúcares simples, mientras que

macromoléculas como proteínas, polisacáridos, o grasas son retenidas (Grandison A.S., 2003).

5.5.1. Parámetros operativos de la membrana

- Presión transmembrana (PTM)

Representa la media entre la presión de entrada (ejercida por el flujo de alimentación) y la presión de salida (ejercida por el flujo de retenido)

$$PTM = \left(\frac{P_{in} + P_{out}}{2} \right) - P_p$$

Donde, PTM es la presión transmembrana, P_{in} representa la presión de entrada (psi), P_{out} es la presión de salida del retenido (psi) y P_p corresponde a la presión de salida del permeado.

En el cálculo de la presión transmembrana, la presión de salida en el flujo de permeado es despreciable en comparación con la presión ejercida por el flujo del retenido. Además como esta válvula permanece siempre abierta durante el proceso de ultrafiltración, se considera que la presión ejercida es igual a la presión atmosférica.

- Flux de permeado

El flux de permeado, es la tasa de permeado por unidad de área de la membrana, por lo que maximizar el flux reduce costos. Se calcula de acuerdo a la siguiente expresión

$$Flux = \frac{kg \text{ de permeado}}{Area \text{ de la membrana} \cdot Tiempo}$$

- Porcentaje de Reducción

$$PR = \frac{100 \cdot (C_F - C_P)}{C_P}$$

Donde C_F y C_P son los contenidos de cada componente en el aceite crudo y en el aceite procesado, respectivamente (Kg / Kg aceite).

6. METODOLOGÍA

6.1. PROCEDIMIENTO

6.1.1. Selección de la Materia Prima

Como principal materia prima se utilizó aceite de oleína de palma la cual se empleó en fritura al vacío de plátano (< 10°Brix) a temperaturas entre 110 °C y 180°C, un tiempo total de 40 horas para el calentamiento y la fritura.

6.1.2. Pre-tratamiento

Las muestras de aceite usado (oleína de palma), fueron seleccionadas al azar y se llevó a cabo un pre-tratamiento de separación física en un sistema büchner – kitasato en vacío a 40°C, con un papel filtro Whatman No. 41 (20-25 µm), con el propósito de remover partículas de gran tamaño que quedan producto de la fritura del plátano. El proceso y los puntos de muestreo se resumen en la figura 6.

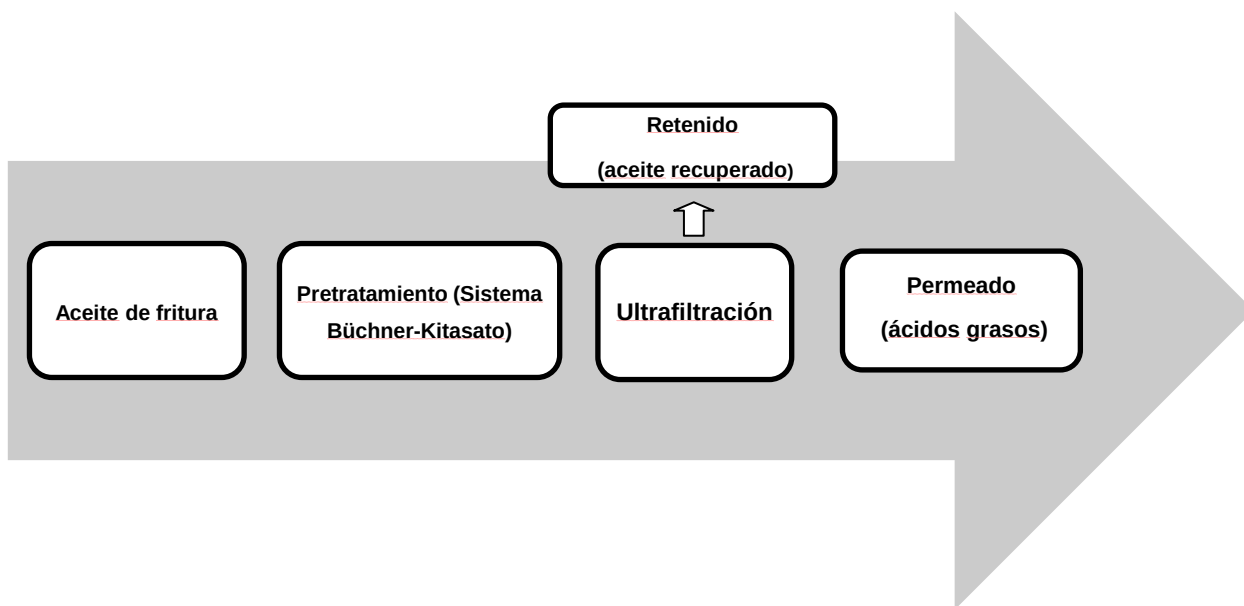


Figura 6. Diagrama de flujo para el pre-tratamiento de los aceites de fritura y el proceso de UF

6.1.3 Ultrafiltración

Para acondicionar la membrana, el contenido de agua que permanecía en el equipo después del proceso de limpieza se eliminó cuando se introdujeron en la membrana 2L de oleína de palma usada filtrada y fueron recirculados durante 30 min. Posteriormente este aceite era expulsado del equipo antes de cada corrida.

Para la experimentación, se empleó un módulo de membrana de filtración Pellicon® 2 de Millipore, como se observa en la figura 7. La membrana consta de un cassette de membranas planas Biomax® de polietersulfón modificado^(y), dispuestas en paralelo y separadas por pantallas de polipropileno^(z), con un área de filtración de 0.5 m² (Dimensiones del cassette son: 17.8 cm de ancho, 21 cm de largo, 2.16 cm de grosor), con una retención de 10 KDa. El alimento es impulsado por una bomba peristáltica de velocidad variable Easy Load® Masterflex de Millipore, con una capacidad de bombeo entre 100 y 600 l/h.

Para el control de las temperaturas de trabajo durante cada corrida se empleó un baño termostático con control de temperatura (JEIO TECH, Heating Bath Circulators, modelo CW-05G, 5°C - 150°C ± 0.1°C) y una balanza con una capacidad de 1500 g ± 0,1 g (Kern & Sohn GmbH, modelo EW 1500-2M).

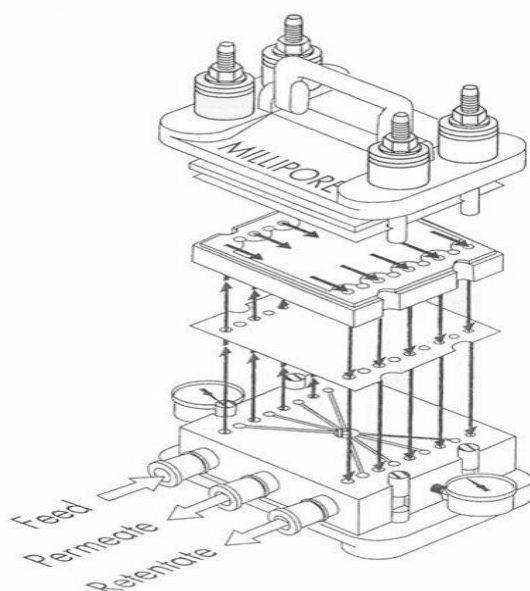


Figura 7. Módulo de ultrafiltración (Tomado de la Guía Pellicon)

Durante el proceso de ultrafiltración se trabajó a diferentes condiciones de presión transmembrana (7.5, 8.75, 10.0, 11.25, 12.5 psi $\pm$ 0.1 psi) y temperatura (30, 35, 40, 45, 50°C $\pm$ 0.1 °C). Para cada tratamiento se utilizaron 3L de muestra y se registraron pesos para el flujo del permeado cada 5 min durante 60 min.

A continuación se presenta un diagrama del proceso de ultrafiltración empleado durante la experimentación.

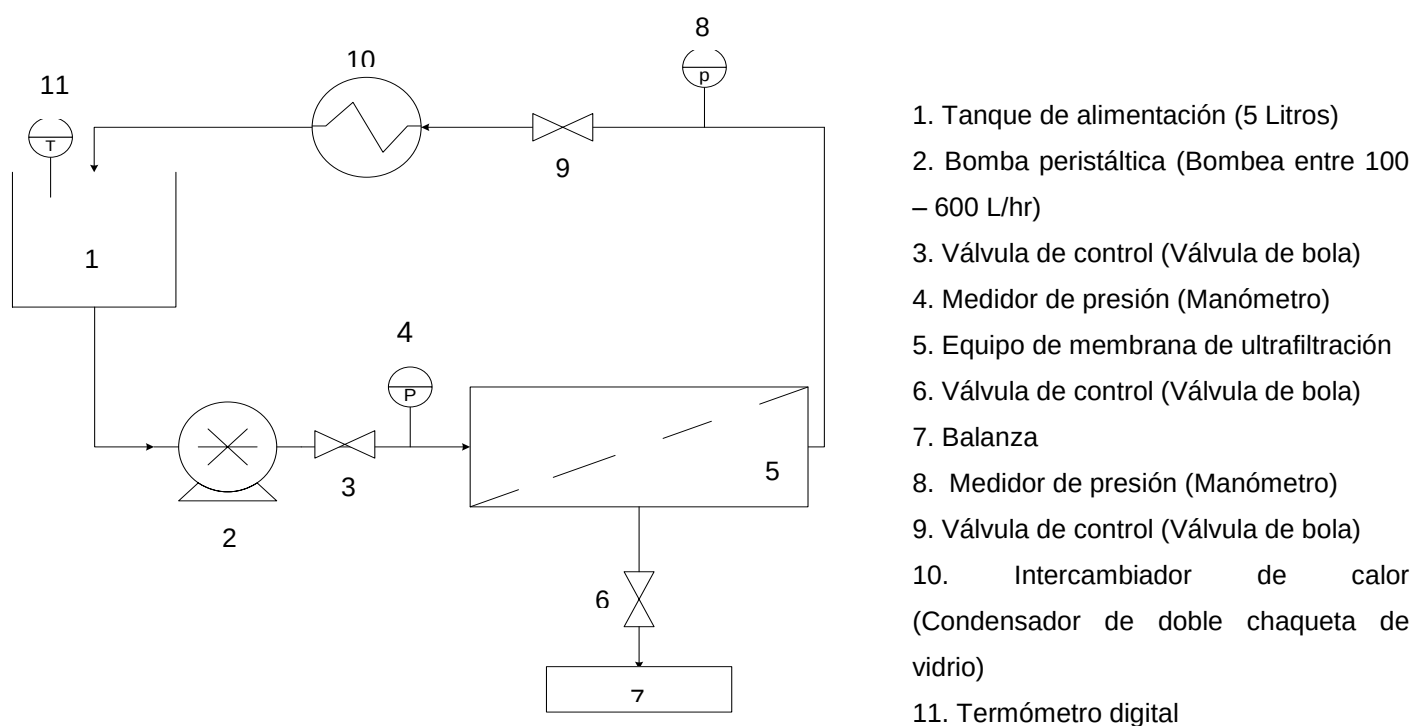


Figura 8. Diagrama del sistema de ultrafiltración

6.2. ANALISIS FÍSICO-QUÍMICOS

Durante cada corrida se recolectaron muestras al inicio y al final y se realizaron pruebas de viscosidad para el flujo de alimentación y el retenido, empleando un viscosímetro Brookfield DV III Ultra Programmable rheometer $\pm$ 0.01 - con un baño termostático Brookfield TC-200 (Temperatura ambiente - 130°C, con un error de $\pm$ 0,03°C), en el

laboratorio de propiedades físicas de la Escuela de Ingeniería de Alimentos de la Universidad del Valle.

Los análisis de índice de acidez y contenido de humedad para los flujos de alimentación y retenido se realizaron siguiendo las Normas Técnicas Colombianas (NTC) 218 y 287 respectivamente en el laboratorio de análisis químico de la Escuela de Ingeniería de Alimentos.

6.3. DISEÑO EXPERIMENTAL – METODOLOGIA DE SUPERFICIE DE RESPUESTA (M.S.R)

Se empleó el diseño central compuesto rotatorio, con un diseño factorial 2^n (niveles de +1 y -1), considerando dos puntos axiales ($+\alpha, -\alpha$), cinco puntos centrales (nivel cero), y dos variables independientes (temperatura y presión transmembrana). En la tabla 4, se registran los niveles de las variables.

Tabla 4. Variables y niveles de variación usados en el diseño experimental

Variables	Niveles				
	$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
A = Temperatura (°C)	30	35	40	45	50
B = Presión transmembrana (psi)	7.5	8.75	10	11.25	12.5

Las variables dependientes fueron Índice de acidez, humedad y viscosidad en el flujo de retenido y flujo de alimentación. Los 13 experimentos del diseño estadístico, fueron llevados a cabo aleatoriamente, cinco de los cuales corresponden a los puntos centrales. La tabla 5 muestra los valores codificados y reales que fueron empleados. Para el análisis se utilizó el software estadístico Design Expert 8.0.5.

Tabla 5. Parámetros del diseño, con dos variables independientes con tres niveles y cinco repeticiones en el punto central

Corrida	Valores Codificados		Valores Reales	
	Temperatura (A)	Presión Transmembrana (B)	Temperatura (°C)	Presión Transmembrana (psi)
1	-1	-1	35	8,75
2	-1	1	35	11,25
3	1	-1	45	8,75
4	1	1	45	11,25
5	-2	0	30	10,00
6	2	0	50	10,00
7	0	-2	40	7,50
8	0	2	40	12,50
9	0	0	40	10,00
10	0	0	40	10,00
11	0	0	40	10,00
12	0	0	40	10,00
13	0	0	40	10,00

7. ANALISIS Y RESULTADOS

7.1. PRETRATAMIENTO

La cantidad de sólidos suspendidos totales (SST) presentes en la oleína de palma usada en fritura al vacío (Figura 9), varió principalmente porque las características físicas de la materia prima no presentaban homogeneidad, por lo que los resultados cambiaron dependiendo del punto de muestreo. En el pretratamiento se eliminó una cantidad total de 16,84 g/L de sólidos suspendidos, con un promedio de 1.29 g/L de sólidos por corrida. El aceite filtrado en todas las corridas se reunió para disponer de la muestra requerida para la operación de UF.

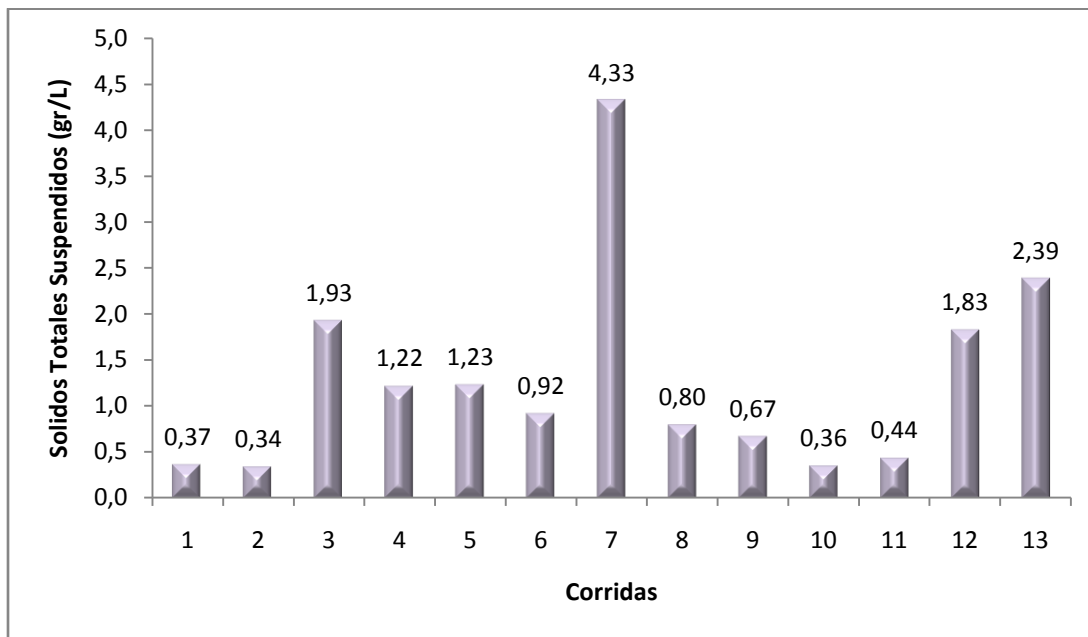


Figura 9. Concentración de sólidos suspendidos totales en el pre-tratamiento del aceite de palma

Procedimientos similares realizados para el tratamiento de efluentes del aceite de palma y recuperación de recursos biológicos con membranas de ultrafiltración, reconocen que una simple filtración juega un papel importante en la reducción de sólidos suspendidos totales (SST), turbidez, sólidos totales disueltos (STD) y demanda química de oxígeno (COD), encontrándose resultados prometedores de disminución del 97.3%, 88.2%, 3.1% y 46.9% respectivamente (*T.Y. WU. et al, 2007*).

7.2. TRATAMIENTO DE ULTRAFILTRACIÓN

7.2.1. Efecto de la presión y la temperatura en el flux de permeado

El rendimiento de la membrana fue determinado a diferentes presiones de trabajo (Tabla 4). En la Figura 10 se registran los cambios del flujo de permeado en el tiempo (60 min) en función de las condiciones de operación adoptadas en este trabajo. Estudios realizados por *Bottino A et al., (2004)*, reportan que las membranas poliméricas proporcionan valores de flux muchos más altos que las membranas cerámicas.

Los valores de flujo de permeado fueron determinados de acuerdo a la ley de Darcy (de *Morais Coutinho C. et al, 2009*)

$$J_v = \frac{p}{\mu R_t}$$

Donde: J_v es el flux de permeado ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$), p corresponde a la presión transmembrana (KPa) μ a la viscosidad del aceite (Pa.s) y R_t a la resistencia total (m^{-1}).

Las muestras ultrafiltradas a bajas presiones, presentaron altos flux de permeado, al igual que a altas condiciones de temperatura. Esto se atribuye a la disminución de la viscosidad del aceite (presenta mejor difusividad molecular), lo que incrementa la transferencia de masa y por consiguiente su tasa de permeado (*Cheryan, 1986*). Presiones iniciales altas de operación garantizan un flux de permeado inicial mayor; sin embargo, se observa una disminución del flux a través del tiempo, lo que se puede

atribuir a la polimerización de la concentración, por la formación de una capa de gel en la superficie de la membrana durante el proceso. Este comportamiento se observa en la figura 10 para todas las corridas experimentales.

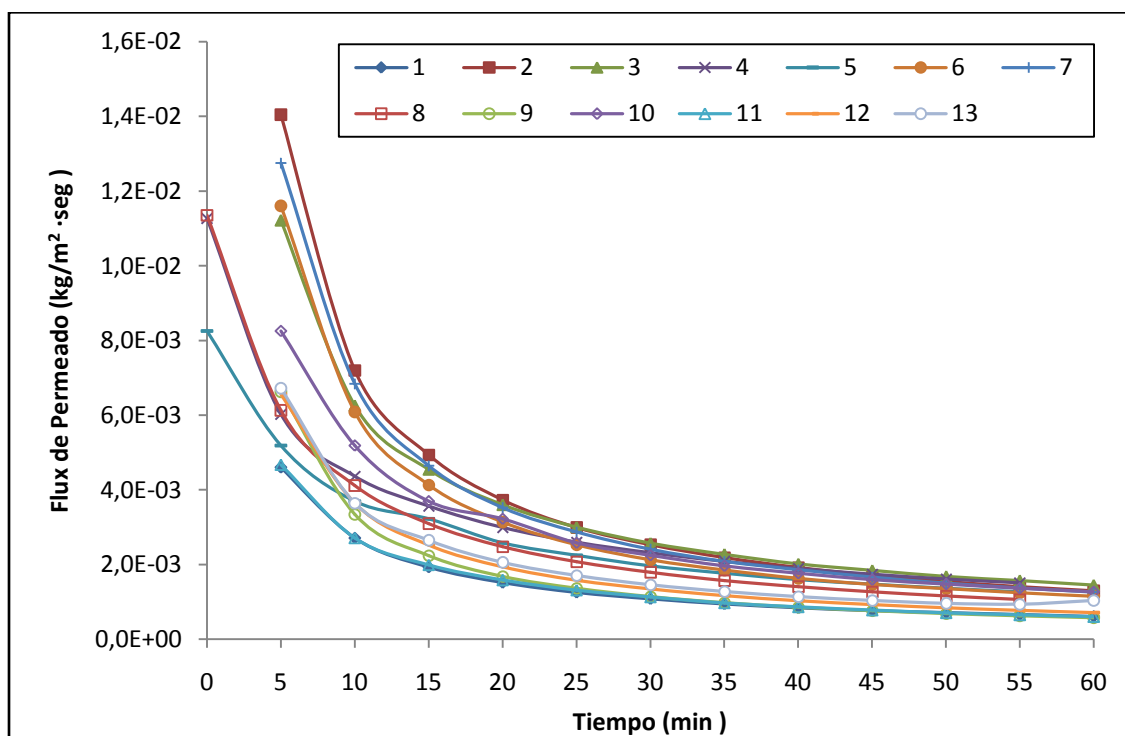


Figura 10. Cambio del flujo de permeado en el tiempo a diferentes condiciones de operación

Un incremento de la temperatura provoca un aumento en el flux, por la disminución de la viscosidad en el aceite, donde un incremento de 30 a 50°C, incrementa la eficiencia del flux de $8,2 \cdot 10^{-3}$ a $1,2 \cdot 10^{-2} \text{ Kg/m}^2 \cdot \text{min}$, ya que mejora la transferencia de masa e incrementa la tasa de permeado (Cheryan, 1986). Sin embargo las altas temperaturas, pueden ser empleadas solo cuando la calidad del aceite en términos de componentes termolábiles, no son significantes (Bottino A et al, 2004)

Altas presiones iniciales de operación garantizan un flux inicial mayor. Sin embargo a mayor presión transmembrana de experimentación, el flux de permeado presenta un

comportamiento independiente de la temperatura, ya que no hay cambios significativos del flux de permeado como consecuencia de la colmatación que sufre la membrana a medida que pasa el tiempo. La dependencia entre el flujo de permeado y la presión aplicada en el proceso de filtración se presenta en la Figura 11.

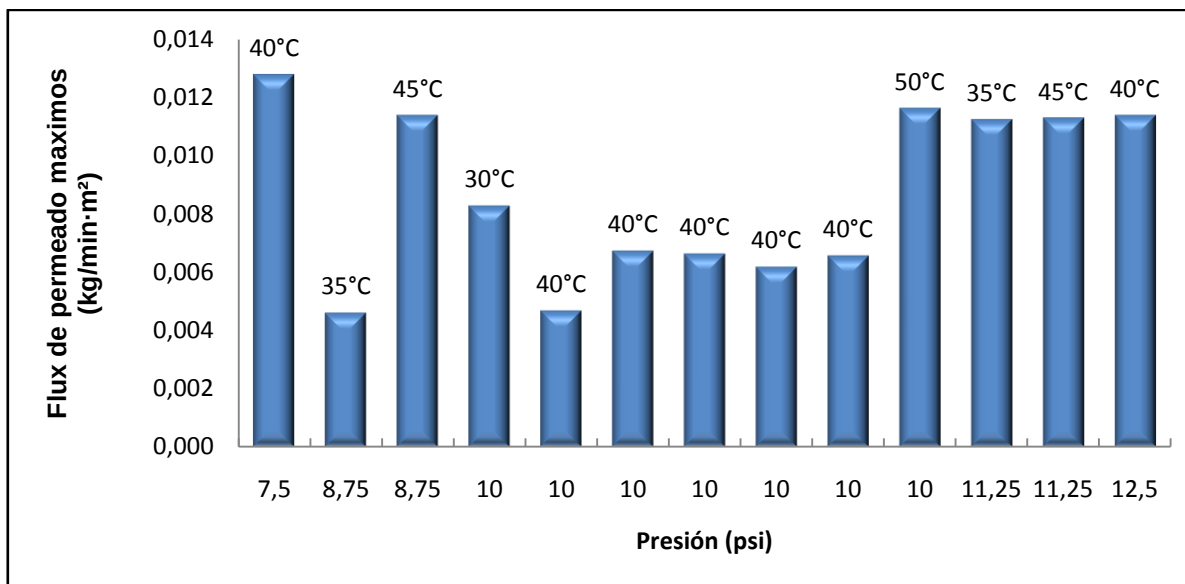


Figura 11. Cambios en el flux de permeado a diferentes presiones en función de la temperatura de filtrado

Las mejores condiciones fueron 7,5 psi y 40°C (Corrida 7), con un flux de permeado de 0,01256 kg/min·m². Estos valores son coherentes con lo reportado por *Bottino A. et al.* (2004), utilizando una membrana polimérica. En general, los valores más elevados de flujo de permeado fueron reportados a las presiones más bajas y presiones más altas evaluadas en este proyecto. Cabe resaltar que la muestra 7 (40°C y 7.5 psi) fue aquella que presentó la mayor cantidad de SST, lo que sugiere que el pretratamiento tiene un efecto significativo en el flujo de permeado de un aceite de fritura. Sin embargo un buen rendimiento del flux de permeado se puede lograr también con altas presiones de trabajo (11,25 psi), a una temperatura de 35 °C (0,01122 kg/min·m²), aunque a 45 °C se obtuvo un flux de permeado similar (0.01127 kg/min·m²).

Arora S. et al (2005), reporta flux de permeado de $0,14 \text{ kg/h}\cdot\text{m}^2$ ($0,00233 \text{ kg/min}\cdot\text{m}^2$) de oleína de palma para una membrana polimérica hidrofóbica no porosa, con 32 cm^2 de área.

A elevadas presiones de ultrafiltración (11,25 – 12,5 psi) no se presentaron variaciones significativas en el flux de permeado entre 35°C y 50°C .

7.2.2. Efecto de la presión y temperatura en la viscosidad

Los aceites y las grasas son ésteres de glicerol y ácidos grasos obtenidos a partir de fuentes animales o vegetales. Debido a que cada aceite tiene diferentes composiciones en ácidos grasos, cada uno de ellos tiene viscosidades diferentes. Los aceites son generalmente más viscosos que las soluciones acuosas, siendo su comportamiento de flujo newtoniano. En términos generales la viscosidad aumenta o disminuye en la medida que la cantidad de ácidos grasos de cadena larga aumenten o disminuyan su saturación. La viscosidad no es una prueba física empleada para caracterizar a un aceite, pero sí es importante en el tratamiento de aceites y grasas (Lewis M.J, 1993) porque permite identificar la presencia de polímeros con altos pesos moleculares.

La formación de compuestos polímeros durante la fritura es el principal responsable de los cambios en la viscosidad del aceite. Esta se incrementa durante la fritura y estuvo influenciada por la temperatura. La reducción de la viscosidad indica que los polímeros, los cuales tienen un alto peso molecular, se reducen en el aceite (Subramanian R, 2000)

Para las muestras evaluadas es fácilmente identificable que la relación entre el esfuerzo de corte y la rapidez de deformación es lineal, el cual es un comportamiento típico de *fluidos newtonianos* (figura 12).

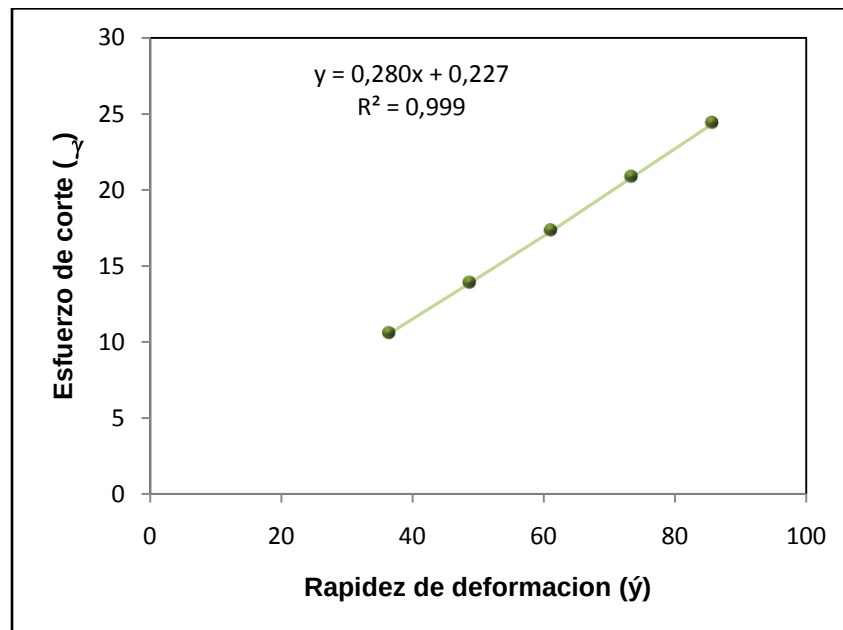


Figura 12. Reograma de un fluido newtoniano

Partiendo de esta consideración se determinó la viscosidad de las muestras del flujo de alimentación y del retenido a las diferentes condiciones en estudio (Tabla 3). Los resultados de viscosidad en función de la presión (Figura 13, A) y la temperatura (Figura 13, B) mostraron que los valores de viscosidad obtenidos para el flujo de retenido, fueron menores que para el flujo de alimentación, lo que indicó una menor saturación en los aceites, resultados que concuerdan con estudios previos realizados para aceite de girasol, donde se obtuvo una reducción en la viscosidad de aceites usados de fritura del 21.6% utilizando una membrana de polisulfona (Subramanian R, 2000).

La disminución de la viscosidad se presenta con el incremento de la temperatura de filtrado (Figura 13, B) de manera que el fluido de retenido presentó una reducción gradual de su viscosidad hasta 40°C y no presentó disminuciones en la misma a mayores temperaturas reportando pequeñas variaciones entre 40 - 50°C.

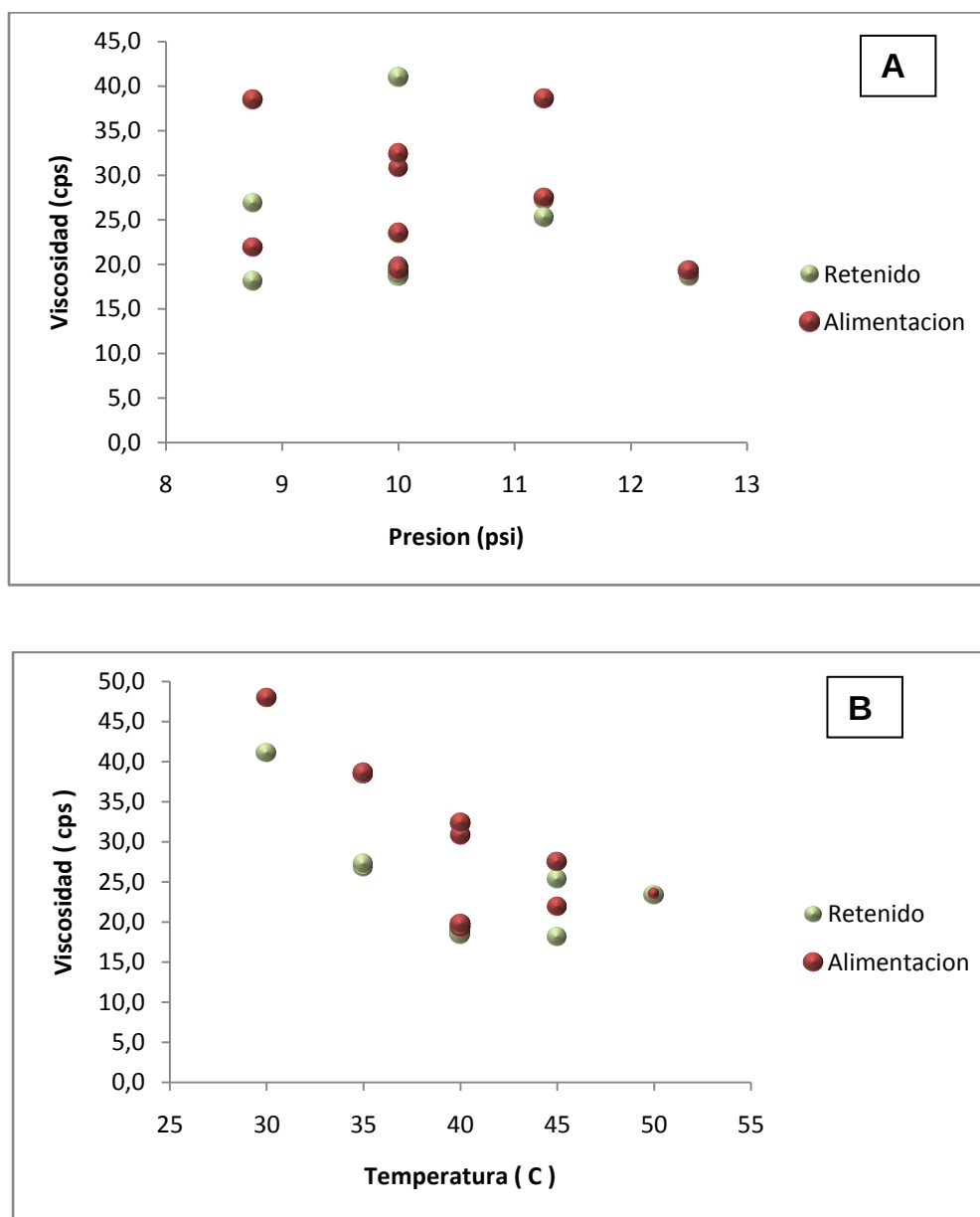


Figura 13. Viscosidad de alimentación y retenido en función de la presión (A) y la temperatura (B)

En la gráfica de dispersión no se observa una clara tendencia del efecto de la presión en la viscosidad de los fluidos evaluados (Figura 13, A). Sin embargo, se reportan las menores viscosidades a las presiones más bajas (7,5 psi) y más elevadas (12,5 psi),

siendo esto coherente con las observaciones realizadas del flux de permeado (Figura 10).

Estudios similares fueron realizados por *Amalia Kartika I et al*, para refinado de aceite crudo de girasol, en los que se midió la viscosidad con un reómetro Carrimed CSL 100 a diferentes temperaturas (Tabla 6). El fluido al igual que en el presente estudio, presentó un comportamiento newtoniano.

Tabla 6. Viscosidad del aceite de alimentación en función de la temperatura

T (°C)	Viscosidad (cP)	Viscosidad (cP)
	Aceite de Girasol	Aceite de Oleína de Palma
35	38.67	38.55
40	32.37	24.79
45	27.66	24.70
50	23.99	23.50

Para el análisis estadístico de los valores de viscosidad se empleó un modelo cuadrático, cuyo análisis de varianza (ANOVA) se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7. ANOVA de la viscosidad de aceites de fritura tratados por ultrafiltración ($R^2=0,7971$)

<i>Fuente de variabilidad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Valor de F</i>	<i>p-value</i>
Modelo	357,50	5,50	0,0226
A - Temperatura (°C)	192,00	14,77	0,0063
B - Presión (psi)	1,61	0,12	0,7350
AB	1,96	0,15	0,7093
A ²	152,95	11,77	0,0110
B ²	0,41	0,031	0,8642

Residual	91,00
Error	0,11
Total	448,49

El análisis de ANOVA de un modelo cuadrático se basa en el hecho de que la suma de los cuadrados totales puede ser dividida en la suma de cuadrados de los factores estudiados (en este caso presión y temperatura), sus interacciones y el error. Los valores-p obtenidos para cada factor contribuyen a la suma de cuadrados totales y los obtenidos del ANOVA establecen el nivel de significancia para el modelo. Para este caso en particular se adoptó un nivel de significancia del 95%, lo que quiere decir que valores p menores a 0.05 indican que desde el punto de vista estadístico el factor temperatura es el único que tiene un efecto significativo en la viscosidad.

La validación de supuestos para el modelo cuadrático no cumple el supuesto de normalidad, por lo que resultó necesario cambiar de modelo. Considerando los resultados del ANOVA del modelo cuadrático, donde se identifica que el factor presión no incide significativamente en la viscosidad del aceite filtrado, se elimina este factor del modelo, el cual se ajusta de manera que solo se tiene en consideración con el factor temperatura, lo que lo hace un modelo lineal. El ANOVA del modelo lineal que relaciona la viscosidad con la temperatura de filtrado se presenta en la Tabla 8.

Tabla 8. ANOVA de la viscosidad de aceites de fritura tratados por ultrafiltración ($R^2=0,7882$)

Fuente de variabilidad	Suma de cuadrados	Valor de F	p-value
Modelo	353.51	18.61	0.0004
A - Temperatura (°C)	192,00	20.22	0.0011
A ²	161.51	17.01	0.0021
Residual	94.87		
Error	0.11		
Total	448,49		

Para el modelo lineal se realizó la validación de supuestos, y la gráfica de normalidad sobre los errores, la cual se cumple, ya que los puntos tienden a ajustarse a la línea recta y el valor p es mayor a 0.05. En la relación residuos vs valor ajustado, se observó que el modelo era el adecuado y de mejor ajuste, debido a que los puntos no siguen ningún patrón.

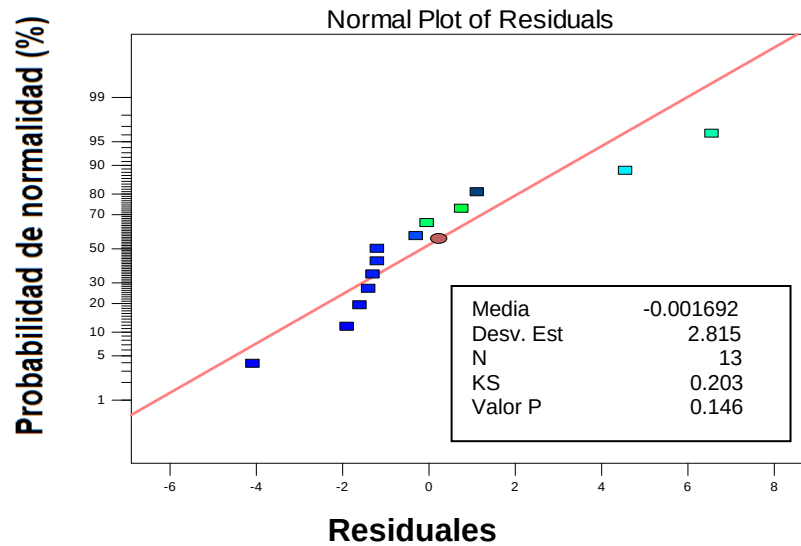


Figura 14. Gráfica de probabilidad normal de los residuos para modelo lineal

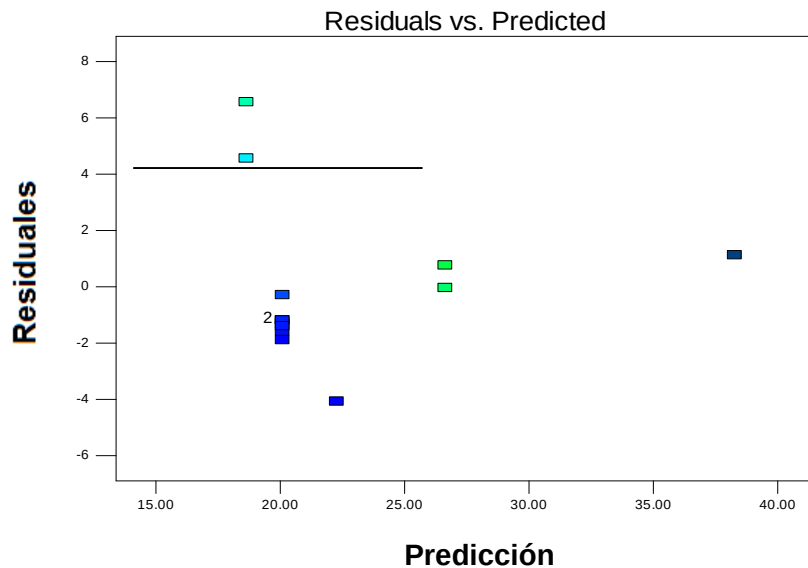


Figura 15. Gráfica de los residuos contra los valores ajustados para un modelo cuadrático

El modelo lineal permite correlacionar las diferentes variables en estudio con la variable respuesta, cuya relación matemática se presenta a continuación:

Ecuación cuadrática final de los factores en términos codificados

$$\text{Viscosidad} = 20.10 - 4.00 \cdot A + 2.55 \cdot A^2$$

Ecuación cuadrática final de los factores en términos reales

$$\text{Viscosidad} = 215.01975 - 8.94617 \cdot T + 0.10183 \cdot T^2$$

Con base en ello es posible determinar los contornos de viscosidad del aceite de fritura en función de la temperatura de ultrafiltración en la Figura 16 y la superficie de respuesta en la Figura 17 (la escala de colores es la misma presentada en las Figuras 14 y 15).

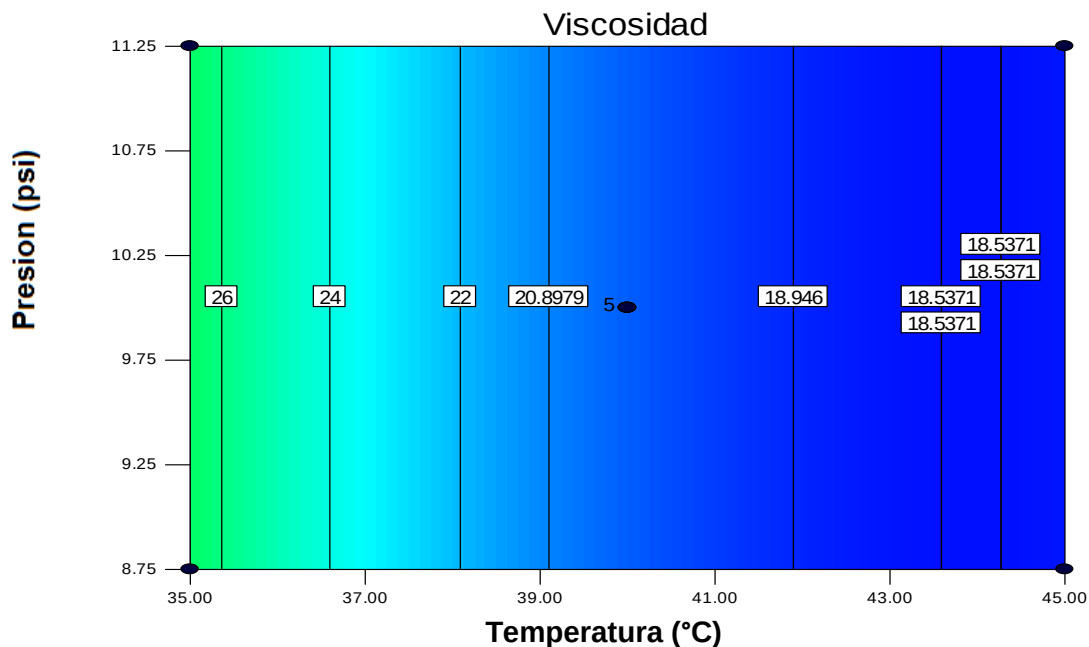


Figura 16. Contornos de viscosidad de un aceite de fritura en función de la temperatura de ultrafiltración

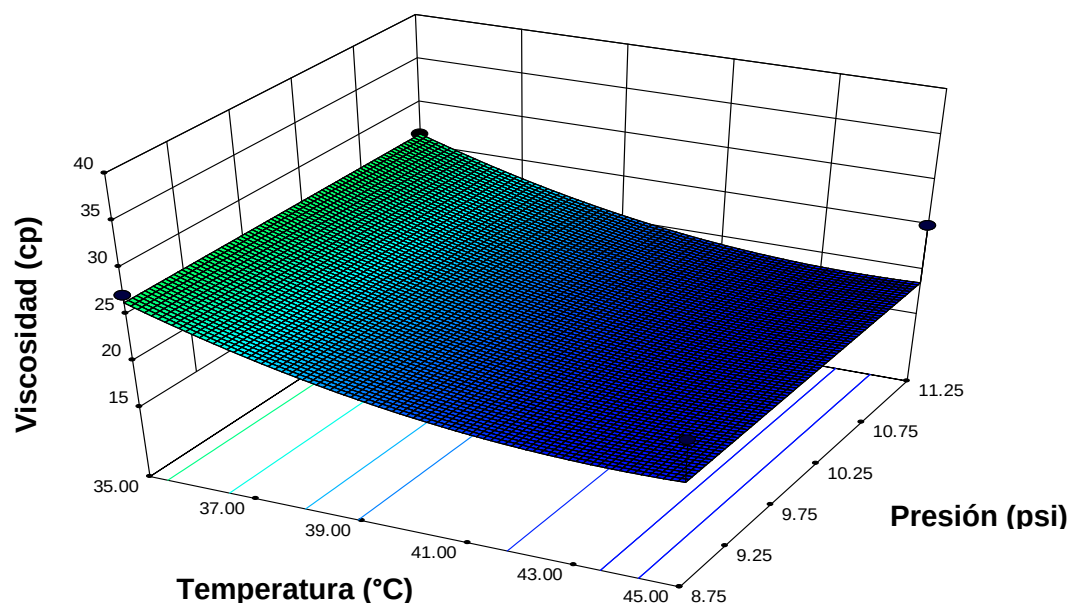


Figura 17. Superficie de respuesta para la viscosidad de un aceite de fritura en función de la temperatura

Estos resultados sugieren que los valores de viscosidad tienden a disminuir en la medida que aumente la temperatura.

7.2.3. Efecto de la presión y la temperatura en la reducción de ácidos grasos libres

El contenido de ácidos grasos libres expresada como porcentaje (% p/p) es conocido como la acidez de un aceite. El índice de acidez es expresado como el número de miligramos de NaOH requeridos para neutralizar los ácidos grasos libres presentes en un gramo de grasa (mg/g). Los valores de acidez para la oleína de palma en estudio, antes y después del proceso con membrana se registran en la Tabla 8, donde la acidez se expresa como ácido palmítico.

No se reportan variaciones significativas en el contenido de ácidos grasos libres en el aceite de fritura a las diferentes condiciones a las que se llevó a cabo el proceso de

ultrafiltración (*Tabla 4*). Sin embargo, se identifica que a una misma temperatura de filtración, el incremento en la presión disminuye el porcentaje de reducción de ácidos grasos, lo que sugiere que el proceso es menos efectivo. Las mayores reducciones de ácidos grasos fueron obtenidas a condiciones de filtración de 30°C y 45°C y a una presión de 10 psi, reportando valores de reducción del 38% y 53%, respectivamente. Estos resultados concuerdan con las gráficas de dispersión para la presión, en donde se observó que el menor porcentaje de ácidos grasos libres (AGL), se obtiene a menor presión de filtración.

Tabla 9. Índice de acidez del aceite de palma antes y después de un proceso de ultrafiltración

<i>Descripción de la muestra</i>	<i>PTM (psi)</i>	<i>Temperatura (°C)</i>	<i>Acidez (mg NaOH/ gr Aceite)</i>	<i>Porcentaje de Reducción (%)</i>
Aceite Usado	-	-	1,957	-
Retenido	10	30	1,212	38,09
	8,75	35	1,4662	25,08
	11,25	35	1,6112	17,68
	7,5	40	1,451	25,88
	10	40	1,5441	21,11
	10	40	1,5291	21,88
	10	40	1,5161	22,53
	10	40	1,5011	23,29
	10	40	1,472	24,81
	12,5	40	1,601	18,19
	8,75	45	1,453	25,77
	11,25	45	0,912	53,41
	10	50	1,375	29,77

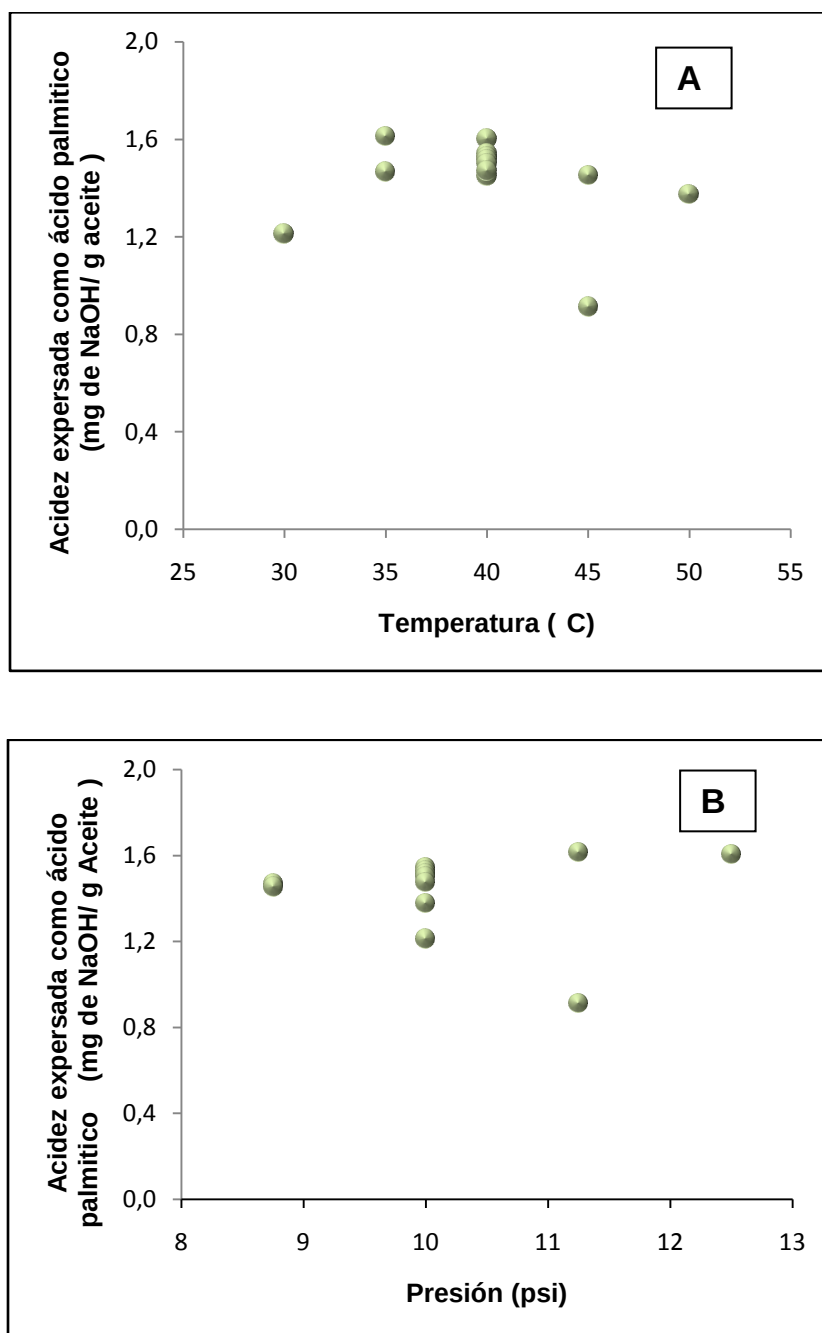


Figura 18. Gráfica de dispersión de la acidez, en función de la temperatura (A) y la presión (B)

Para el análisis estadístico de los valores de acidez, se empleó un modelo cúbico, cuyo análisis de varianza (ANOVA) se presenta en la Tabla 10. Los *valores p* obtenidos para

cada factor obtenido del ANOVA no establecen el nivel de significancia para la temperatura y la presión, sin embargo sí hay significancia cuando hay interacción de los dos factores en la variable de respuesta (en este caso la acidez). Para este caso en particular se ha adoptado un nivel de significancia del 95%, lo que quiere decir que valores p menores a 0.05 indican que, desde el punto de vista estadístico, los factores temperatura y presión o sus interacciones tienen un efecto significativo en la acidez.

Tabla 10. ANOVA de la acidez expresada como ácido palmítico de aceites de fritura tratados por ultrafiltración ($R^2=0,8938$)

<i>Fuente de variabilidad</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Valor de F</i>	<i>p-value</i>
Modelo	0,35	6,01	0,0329
A - Temperatura (°C)	0,013	1,61	0,2599
B - Presión (psi)	0,011	1,38	0,2935
AB	0,096	11,63	0,0191
A ²	0,055	6,63	0,0497
B ²	$2,033 \times 10^{-003}$	0,25	0,6402
A ² B	0,063	7,63	0,0398
AB ²	0,11	13,24	0,0149
Residual	0,041		
Error	0,013		
Total	0,39		

Al realizar la validación de supuestos se identificó que se cumple con la normalidad sobre los errores, y el valor p es mayor a 0.05 (0.142). En la relación de los residuos contra el valor ajustado, se observa que el modelo es el adecuado y de mejor ajuste, debido a que los puntos no siguen ningún patrón.

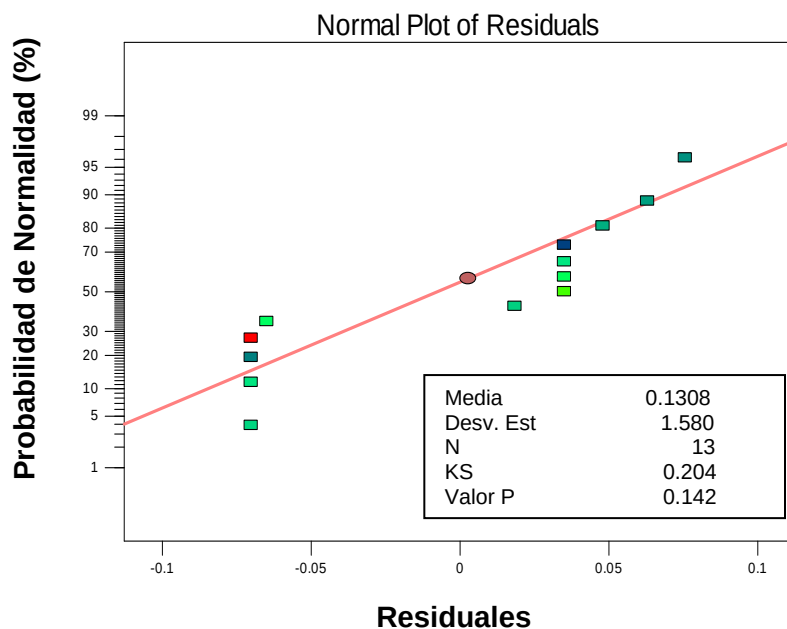


Figura 19. Gráfica de probabilidad normal de los residuales para la acidez usando un modelo cúbico

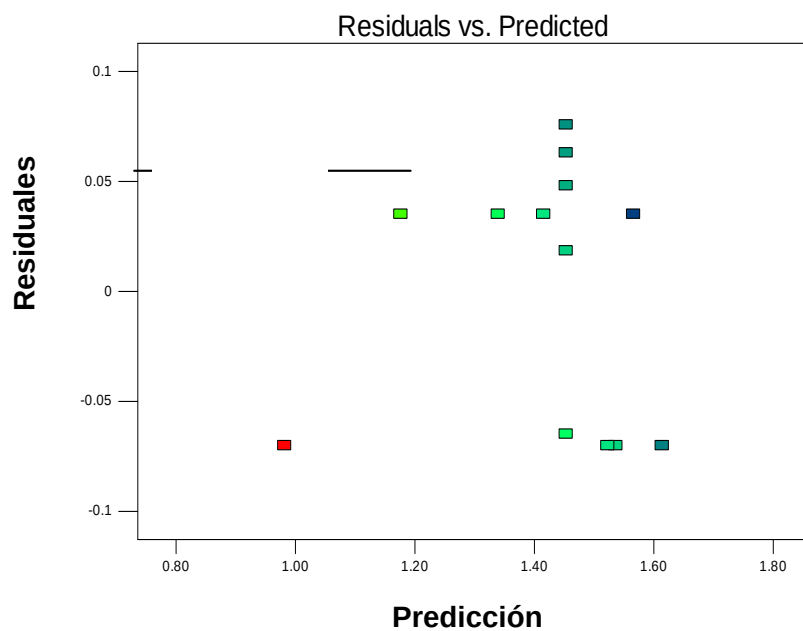


Figure 20. Gráfica de los residuales contra los valores ajustados para un modelo cúbico

El modelo cúbico permitió correlacionar las diferentes variables de estudio con la variable respuesta (la acidez en este caso), cuya relación matemática se presenta a continuación:

Ecuación final en términos de factores codificados:

$$\begin{aligned} \text{Acidez} = & 1.45 + 0.041 \cdot A + 0.03 \cdot B - 0.15 \cdot A \cdot B - 0.049 \cdot A^2 + 9.420e^{-0.003} \cdot B^2 \\ & - 0.15 \cdot A^2 - 0.20 \cdot A \cdot B^2 \end{aligned}$$

Ecuación final en términos de factores reales:

$$\begin{aligned} \text{Acidez} = & 170.46161 - 6.10336 \cdot T - 27.65635 \cdot P + 0.88552 \cdot T \cdot P + 0.047142 \cdot T^2 \\ & + 1.04106 \cdot P^2 - 4.90943e^{-0.003} \cdot T^2 \cdot P - 0.02587 \cdot T \cdot P^2 \end{aligned}$$

Con base en ello es posible determinar los contornos y la superficie de respuesta de acidez del aceite de fritura en función de la temperatura y presión de ultrafiltración que se presentan en las Figuras 21 y 22, respectivamente. Estos resultados mostraron que la menor acidez encontrada se obtiene a unas condiciones de proceso de 45°C – 11.25 psi. Siendo esto coherente con los resultados obtenidos de viscosidad, donde con altas presiones de operación y altas temperaturas del alimento se obtiene la menor saturación de ácidos grasos libres en un aceite usado de palma, después del tratamiento de ultrafiltración.

Lo que planea una solución al problema de contaminación de aceites debido a que son residuos que aunque no reciben la clasificación de peligrosos, no deben verterse por los desagües por su capacidad para formar películas sobre el agua residual, impidiendo la oxigenación y dificultando la correcta depuración de las aguas a donde ellos se vierten.

En la actualidad no existe regulación específica en Colombia para lo que se considera hoy en día como el desecho doméstico más contaminante. Sólo el proyecto de acuerdo No 329 de 2009 del Concejo de Bogotá, limita el uso de aceites residuales a la fabricación de concentrados para la alimentación de animales, porque puede causar

serios problemas a la población, debido a que los compuestos formados durante la fritura como ácidos grasos trans y dioxinas pueden ser transferidos al producto final, teniendo implicaciones negativas en el consumidor.

Estudios realizados para la alimentación de pollos con aceites usados concluyen que la alteración de los aceites, es decir, la formación de dioxinas y productos de oxidación no presentan ningún efecto en el rendimiento y productividad de pollos. Sin embargo un elevado nivel de ácidos grasos trans (12%), disminuye la respuesta productiva de estos animales (*Choque-López J.A et al, 2010*).

Según se encuentra con el trabajo realizado, es posible reducir el nivel de contaminación de los aceites usados por UF. Esta tecnología puede ser empleada como alternativa al uso de solventes que generan residuos perjudiciales para la salud, para la adecuación de aceites (reducción de ácidos grasos libres y agua) con el propósito de que éstos puedan ser empleados en la elaboración de alimento para animales.

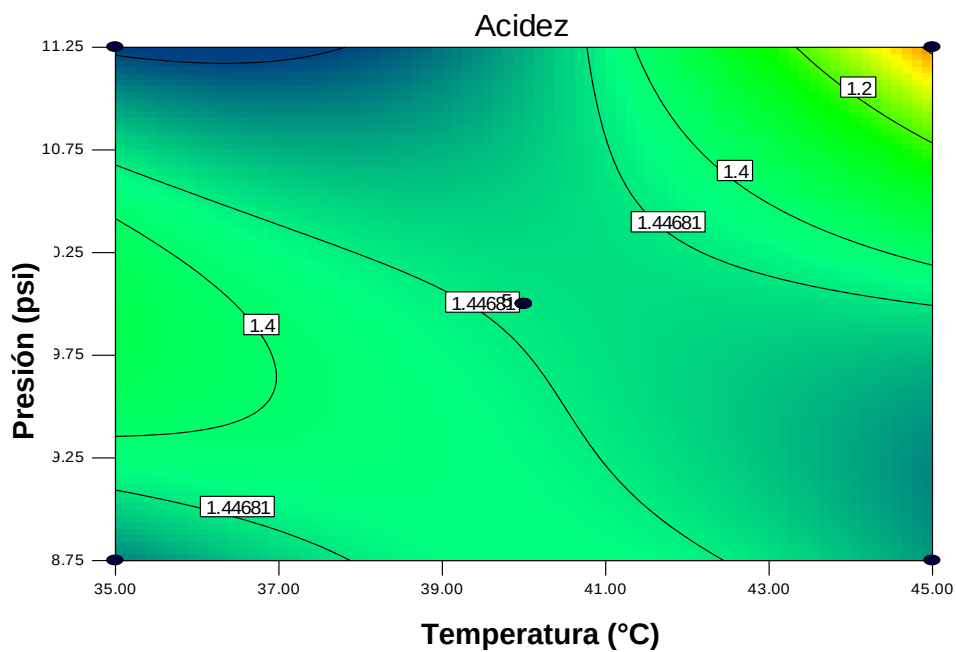


Figura 21. Gráfica de contorno de la acidez de un aceite usado en función de la temperatura y presión

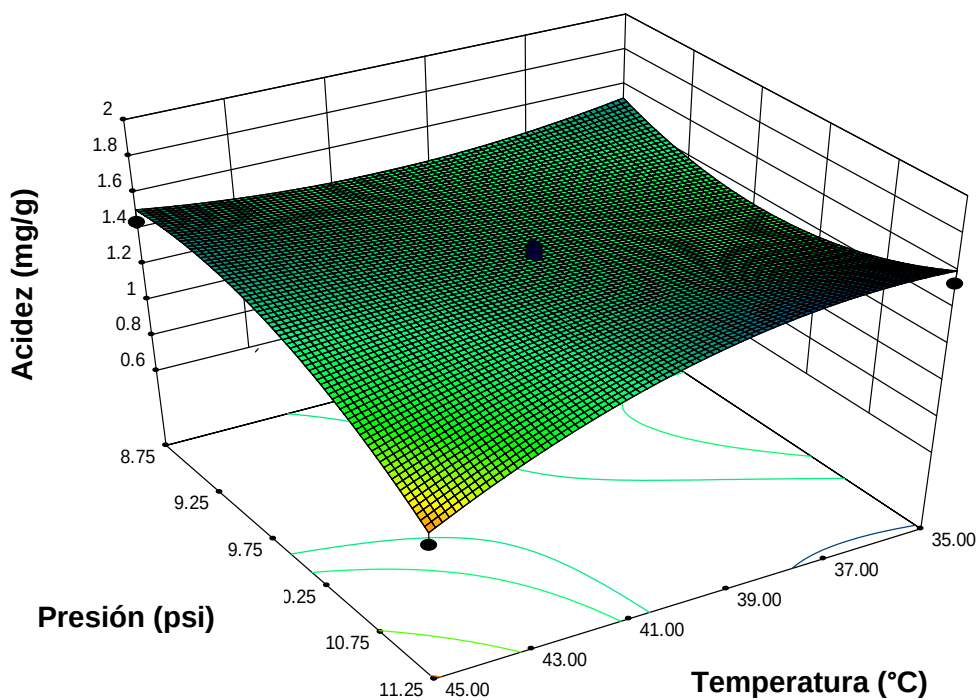


Figure 22. Gráfica de superficie de respuesta de la acidez de un aceite usado

7.2.4. Efecto de la temperatura y presión en la eliminación de agua

Un parámetro de calidad del aceite evaluado fue la humedad, responsable de la hidrólisis de triglicéridos dando como resultado la creación de ácidos grasos libres, monoglicéridos, diglicéridos y en algunos casos extremos, glicerol (Fritsch C.W, 1981). En la siguiente tabla se presentan los datos de humedad encontrados para cada una de las corridas. La humedad del flujo de alimentación fue de 11.342%

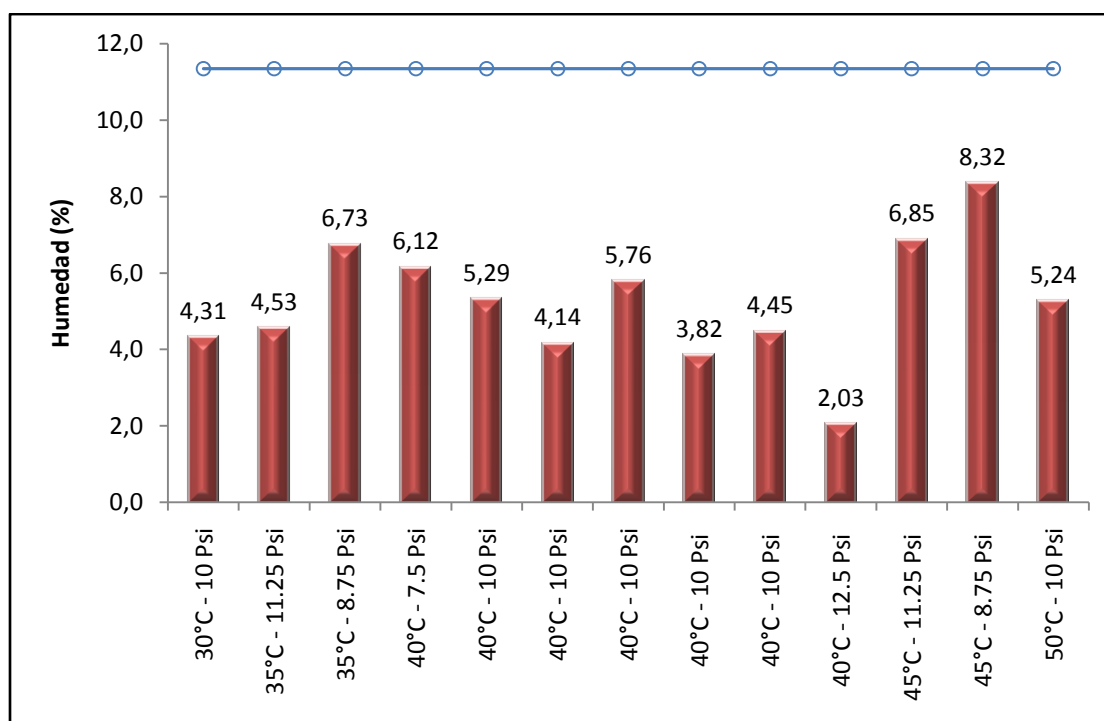


Figura 23. Comparación de la humedad del flujo de alimentación (o), con el retenido a las condiciones de ultrafiltración evaluadas

La cantidad de agua presente en el flujo de alimentación es alta, como resultado de la transferencia de masa que existe entre el alimento y el aceite durante el proceso de fritura. Sin embargo la humedad (%), presente en el retenido resulta ser significativamente menor, cuando se trabaja a bajas presiones debido a que no hay una pérdida significativa de agua a iguales condiciones de temperatura. Cuando se trabaja a altas presiones donde el punto mínimo de humedad (%) se obtuvo a 12.5 Psi y 40°C, por lo que se concluye que a altas presiones se presentan superiores pérdidas de contenido

de humedad en el aceite, debido a que la tasa de separación aceite – agua es proporcional a un aumento de la presión transmembrana; estudios previos manifiestan que la presión transmembrana es uno de los factores que afectan la eficiencia de la separación aceite – agua (Kocherginsky T. et al, 2003; Ezzati A. et al, 2005).

7.2.5. Correlación entre la acidez y el contenido de humedad del aceite usado y clarificado.

La acidez y el contenido de humedad en un aceite usado, permiten determinar la calidad final del mismo y del uso que se le dará al aceite clarificado.

En la tabla 11, se presentan los resultados de índice de acidez, humedad y viscosidad de cada uno de los tratamientos realizados a las condiciones de operación mencionadas en la tabla 4.

Tabla 11. Correlación entre el índice de acidez y la humedad para muestras de aceite crudo y retenido.

	Condiciones		Acidez expresada como ácido palmítico mg NaOH/ gr Aceite	Humedad (%)	Viscosidad (cps)
	T (°C)	P (psi)			
<i>Aceite usado</i>	-	-	1.957	11.342	Tabla 6.
<i>Retenido</i>	30	10	1.212	4.307	41.00
	35	8.75	1.466	4.527	26.80
	35	11.25	1.611	6.732	27.25
	40	7.5	1.451	6.123	18.45
	40	10	1.544	5.291	18.60
	40	10	1.529	4.141	19.70
	40	10	1.516	5.764	19.25
	40	10	1.501	3.825	18.80
	40	10	1.472	4.445	18.55

Evaluación de la tecnología de ultrafiltración para el tratamiento
de aceite de palma (*Elaeis Guineensis*) usado en fritura

40	12.5	1.601	2.031	19.10
45	11.25	0.912	6.849	25.25
45	8.75	1.455	8.324	18.10
50	10	1.375	5.236	23.40

Se aprecia que la menor acidez se presentó a 45°C y 11.25 psi con 0.912 mg NaOH/gr aceite, con una humedad de 6.949%, condiciones con las que se alcanza una reducción de casi el doble respecto a la humedad inicial en el flujo de alimentación.

A 30°C y 10 psi, se presenta un contenido de ácidos grasos de 1.212 mg NaOH/gr aceite, con una humedad de 4.307% la cual es aceptable teniendo en cuenta que los concentrados para animales pueden presentar máximo 13% de humedad.

8. CONCLUSIONES

- El flux de permeado es directamente proporcional al cambio en la presión transmembrana. Sin embargo, se registra el mayor flux de permeado a la menor presión y una temperatura de experimentación de 40°C. A presiones altas se presenta la polarización de la concentración y a su vez se aumenta la probabilidad de causar la colmatación de la membrana, lo que reduce la eficiencia en el proceso de filtración.
- Las altas presiones y temperaturas, ejercen un efecto en la reducción de ácidos grasos libres, factores que por separado no presentan ninguna influencia en la variable de respuesta. Este fenómeno se puede observar tanto en los resultados del índice de acidez como de la viscosidad, cuyas condiciones óptimas de operación fueron 11.25 psi y 45°C, para ambos factores.
- Los modelos sugeridos para el análisis estadístico de los datos presentaron una correlación aceptable, con un ajuste adecuado y por tanto fueron los más indicados para analizar los datos.
- El proceso de ultrafiltración arroja resultados satisfactorios en la adecuación de aceites deteriorados, disminuyendo el contenido de ácidos grasos libres y el contenido de humedad. Es una alternativa eficiente para el mejoramiento de la calidad de aceites usados resultantes de procesos de fritura; siendo una opción viable en el tratamiento de efluentes que contengan aceites deteriorados como contaminantes.
- La tecnología de membranas mejora las características fisicoquímicas de los aceites deteriorados, obteniendo resultados aceptables para la reutilización de los aceites en procesos de fabricación de concentrados para animales.

9. REFERENCIAS

1. **Amalia** Kartika I; **Pontalier** P.Y.; **Rigal** L. Refining of crude sunflower oils using ultrafiltration. Dairy and food applications - Centre for membrane science and technology. *Pages 1 -6*.
2. **Arora S**; **Manjula S**; **Gopala Krishna A.G**, **Subramanian R**. *Membrane Processing of crude palm oil. (2005). Desalination 191, Pages 454–466.*
3. **Bailey A.E.** *Aceites y grasas industriales (1984). Editorial Reverté - España*
4. **Baker R.** *Membrane Technology and Applications (2004). Editorial: John Wiley & Fuerons, Ltd, England, Pages 237-272.*
5. **Bottino A.**, **Capannelli G.**, **Comite A.**, **Ferrari F.**, **Marotta F.**, **Mattei A.**, **Turchini A.** Application of membrane processes for the filtration of extra virgin olive oil **(2004)**. *Journal of Food Engineering, Chapter 65(2), Pages 303 – 309.*
6. **Bowen R.**, **Jenner F.** Theoretical description of membrane filtration of colloids and fine particles: An assessment and review **(1995)**. *Advances in Colloid and Interface Science, Chapter 56, Pages 141-200.*
7. **Blumenthal M.M.** *Frying Technology in Edible Oil and Fat Products. Products and Application Technology (1996).* In **Hui, Y.H.** *Bailey's Industrial Oil and Fat Products, (Ed.). 6th, Vol. 3. Editors: John Wiley and sons, New York, Pages 429-481.*
8. **Clark, W.L.**; **Serbia, G.W.** Safety aspects of frying fats and oils **(1991)**. *Food Technology. Vol 45(2), Pages 84-89.*
9. **Chang S.S**, **Peterson R.J.**, **Ho C.T.** Chemical reactions involved in the deep-fat frying of foods **(1978)**. *Journal of the American Oil Chemists Society, Chapter 55, Pages 178-272.*
10. **Cheryan, M.** *Ultrafiltration and Microfiltration Handbook (1986). Editorial: Technomic Publishing Co., Lancaster, PA. Page 527.*
11. **Cheryan M.**, **Raman L.P.**, **Rajagopalan, N.** Refining vegetable oils by membrane technology **(1994)**. **Yano T**, **Matsuno R.**, **Nakamura K.** *Developments in Food Engineering. Editorial: Blackie Academic & Professional, Tokyo. Pages 677-679.*

12. **Choque-López J.A.; Baucells M.D.; Mateus E.F.; Gómez de Segura A.; Barroeta A.C.** Alimentación de pollos de carne con materias grasas recicladas. **(2010)**. PV albéitar
13. **Dadán S.** El aceite de palma: Un alimento saludable, beneficioso y muy colombiano **(2010)**. La palma de aceite. *Fedepalma*.
14. **de Moraes** Coutinho C., **Chiu M.C.**, **Correa** Basso R., **Badan** Ribeiro A.P., **Guaraldo** Gonçalves L.A., **Viotto** L.A. State of art of the application of membrane technology to vegetable oils: A review **(2009)**. Food Research International, Chapter 42 (5-6), Pages 536–550.
15. **Ezzati A.**, **Gorouhi E.**, **Mohammadi T.** Separation of water in oil emulsions using microfiltration **(2005)**. Desalination, Chapter 185 (1-3), Pages 371–382.
16. **FAS-USDA** - Foreign Agricultural Service. Oilseeds: World Markets and Trade **(2010)**. URL:[http://www.fas.usda.gov/oilseeds_arc.asp]
17. **FAO** - Food and Agriculture Organization of the United Nations. World cropped area, yield and production of oil bearing crops **(2009)**. URL:[<http://www.fao.org/economic/the-statistics-division-ess/chartroom-and-factoids/chartroom/36-world-cropped-area-yield-and-production-of-oil-bearing-crops/zh/>]
18. **Firestone D.** Regulation of frying fats and oils. In: Deep frying: Chemistry, Nutrition and practical Applications **(1996)**. Edited by EG Parkins & MD Erickson. Champaign, IL. AOCS Press.
19. **Firestone, D.**, Regulatory Requirements for the Frying Industry. **(2004)**, En: Gupta, M. K., Warner, White P. J., (ed.), Frying technology and practices. AOCS Press., Champaign.
20. **Fritsch C.W.** Measurements of frying fat deterioration: a brief review **(1981)**. Journal of the American Oil Chemists' Society. Chapter 58(3), Pages 272–274.
21. **Gata J.**, **Sevillano J.S.**, **Cuesta I.**, **Sánchez P.J.**, **Amaro M.A.** Control de calidad en aceites y grasas en restauración colectiva del distrito sanitario de Jaén **(1997)**. Alimentaria, Capítulo 284, Páginas 49-51.
22. **Gertz Ch.** Regulations of frying oils **(1986)**.
23. **Gunstone F.D.** Palm Oil – Market report **(2010)**. Lipid Technology, Chapter 22(4), Page 96.

24. **GUIA PELLICON MILLIPORE.** Módulos de ultrafiltración Pellicon. URL:
[<http://www.millipore.com/catalogue/module/c613?langchange=true>NºEspecificaciones
]
25. **Grandison A.S.** Membrane Filtration Techniques in Food Preservation **(2003)**.
Zeuthen, P., Bogh-Sorensen, L. Food preservation techniques. Editorial: Woodhead
Publishing Ltd, Cambridge, *Pages 263-283*.
26. **Gruenwedel W., Whitaker John R.** Food analysis: Principles and techniques **(1987)**.
Vol 4. Physicochemical Techniques.
27. **Kocherginsky N.M., Tan C.L., Lu W.F.** Demulsification of water-in-oil emulsions via
filtration through a hydrophilic polymer membrane **(2003)**. Journal of Membrane
Science, Chapter 220 (1-2), *Pages 117–128*.
28. **Koseoglu, S. S., Lawhon, J. T., Lusas, E. W.** Membrane processing of crude
vegetable oils: Pilot plant scale removal of solvent from oil miscellas **(1990)**. Journal of
American Oil Chemists Society, Chapter 67, *Pages 315–322*.
29. **Lewis M.J.** Propiedades Físicas de los Alimentos y de los Sistemas de Procesado
(1993). Acribia Edn. Zaragoza, España. *Página 512*.
30. **Lin L., Koseoglu S.S.** Membrane processing of fats and oil **(2005)**. **Shahidi,**
Fereidoon. Bailey's Industrial Oil and Fat Products 6th Ed, Vol 5. Editorial: John Wiley
and sons, New York. *Pages 433-457*.
31. **Lipnizki F.** Basic Aspects and Applications of Membrane Processes in Agro-Food and
Bulk Biotech Industries **(2010)**. Comprehensive Membrane Science and Engineering,
Chapter 4.06, *Pages 165-194*.
32. **Londoño Arango J.** Proyecto Aceites Vegetales Sostenibles. **(2008)**. Proyecto Para
La Recuperación Y Reutilización De Aceites Vegetales Usados En Centros Urbanos
De Colombia. Federación Nacional de Biocombustibles de Colombia (Fedepalma).
Páginas 1-19. Bogotá. URL:[<http://www.fedebiocombustibles.com/v2/nota-web-id-55.htm>]
33. **Lonsdale H.K.** The growth of membrane technology **(1982)**. Journal of Membrane
Science, Chapter 10(2-3), *Pages 81-181*.
34. **Ma A.N.** Environmental management for the palm oil industry **(2000)**. Palm Oil
Developments, Chapter 30, *Pages 1-10*

35. **Malaysian Palm Oil Council (MPOC)**. The Oil **(2009)**. Palm Oil Plantation. URL: [http://www.mpoc.org.my/The_Oil.aspx]
36. **Moreira**, Rosana G., **Castell-Perez**, M. Elena, **Barrufet**, Maria. Deep Fat Frying: Fundamentals and Applications **(1999)**. Aspen Publishers
37. **Mobin Siddique**, B., **Ahmad**, A., **Hakimi Ibrahim**, M., Hena, S., **Rafatullah**, M., & **Omar A. K**, M. Physico-chemical properties of blends of palm olein with other vegetable oils **(2010)**. Revista Grasas y Aceites, Capitulo 61(4), paginas 423-429.
38. **NTC** (Normas Técnicas Colombianas) 3272. Grasas y aceites comestibles para frito industrial. **(1997)**. ICONTEC.
39. **NTC** (Normas Técnicas Colombianas) 218. Grasas y aceites vegetales y animales. Determinación del Índice de Acidez y de la Acidez. **(1999)**. ICONTEC.
40. **NTC** (Normas Técnicas Colombianas) 218. Grasas y aceites animales y vegetales. Determinación del contenido de humedad y materia volátil. **(2002)**. ICONTEC.
41. **Pérez-Camino** M.C. Alteración termo oxidativa en aceites y grasas comestibles: formación de nuevos compuestos y métodos para su evaluación **(1986)**. Tesis de Doctorado en Ciencias Químicas, Facultad de Química, Universidad de Sevilla, España.
42. **Pozo-Diez** R.M. Estudio del proceso de fritura de alimentos frescos y congelados pre-fritos. Comportamiento del aceite de semilla de girasol de alto contenido de ácido oleico **(1994)**. Tesis de Doctorado del Programa de: Farmacia, Nutrición y Bromatología, Universidad de Alcalá de Henares, España.
43. **Proyecto de acuerdo nº. 329 de 2009**. "por el cual se establecen las condiciones técnicas para el manejo, almacenamiento, transporte, utilización y la disposición de aceites vegetales de fritura usados, se crea el programa intersectorial de prevención de la contaminación y gestión ambiental de residuos de aceites vegetales de fritura usados y control de la contaminación hídrica en la ciudad de Bogotá y se dictan otras disposiciones" Concejo de Bogotá .D.C, Anales del consejo de estado.
44. **Ruiz-Méndez** M.V. Modificaciones producidas durante el proceso de refinación de los aceites comestibles **(1993)**. Tesis de Doctorado en Ciencias Químicas, Facultad de Química, Universidad de Sevilla, España.
45. **Rosell** J.B. Industrial frying process, Fat and oil **(1998)**. Revista Grasas y Aceites, Capítulo 49, Paginas 282-295.

46. **Schirg** P.G. Introducción a la teoría y práctica de la técnica de membranas **(2001)**. PS Prozesstechnik GMBH. *Páginas 4-62*.
47. **Subramanian** R., **Nandini** K.E., **Sheila** P.M., **Gopalakrishna** A.G., **Raghavarao** K.S.M.S., **Nakajima** M., **Kimura** T., **Maekawa** T. Membrane processing of used frying oils **(2000)**. Journal of the American Oil Chemists Society, Chapter 77(3), *Pages 323-328*.
48. **Subramanian**, R., Ichikawa, S., Nakajima, M., Kimura, T., & Maekawa, T. Characterization of phospholipid reverse micelles in relation to membrane processing of vegetable oils **(2001)**. European Journal Lipid Science Technology, Chapter 103, *Pages 93–97*.
49. **Wu** T.Y., **Mohammad** A.W., **Jahim** J. Md., **Anuar** N. Palm oil mill effluent (POME) treatment and bioresources recovery using ultrafiltration membrane: Effect of pressure on membrane fouling **(2007)**. Biochemical Engineering Journal, Chapter 35, *Pages 309–317*

ANEXO 1

- **PROCESO DE LIMPIEZA DE LA MEMBRANA**

1. Aflojar la abrazadera que sujeta a la manguera
2. Llenar el recipiente de alimentación con 4 L de solución (agente de limpieza- Lauril sulfato de sodio) y 2 L de Tween 80
3. Ajustar la velocidad en la bomba.
4. Encender la bomba y recolectar la solución (agente de limpieza) en el recipiente de residuos.
5. Apretar el tubo de retenido para aumentar la velocidad de flujo de permeado.
6. Apagar la bomba y se desecha la solución.
7. Lavar la membrana con agua destilada para eliminar residuos que han quedado de la anterior solución.
8. Almacenar la membrana, con una solución de NaOH al 0.1N.