

# Tecnología de membranas: Ultrafiltración<sup>1</sup>

## Membrane technology: Ultrafiltration

## Tecnologia de membrana: Ultrafiltração

C.A. Solís, C.A. Vélez y J.S. Ramírez-Navas

Recibido: mayo 16 de 2016 - Aceptado: mayo 31 de 2017

**Resumen**— Las Tecnologías de Membranas TM tienen gran incidencia en el desarrollo de nuevos y mejores productos, en la conservación del medio ambiente, en la industria de pinturas y la medicina, entre otros. En la industria de los alimentos las TM se aplican en diversas áreas, por ejemplo, en la desalinización de agua de mar, en el tratamiento de aguas residuales y en la clarificación de jugos. En el caso de los lácteos, se la ha empleado en la producción de nuevos derivados, como es el caso de las proteínas del lactosuero o la lactosa. En la presente revisión, se estudió el uso de la Ultrafiltración UF. Se hace un especial énfasis en la industria láctea, donde se esboza el creciente auge de las TM, gracias a que permite la retención y separación de partículas, a que es amigable con el medio ambiente y a que permite el desarrollo de nuevos alimentos. Finalmente es indispensable continuar buscando alternativas para controlar la colmatación de las membranas, logrando extender la vida útil de estos materiales, ya que es el fenómeno que más las afecta.

**Palabras clave**— Tecnologías de membrana, ultrafiltración, separación, proteínas del lactosuero.

**Abstract**— Membrane Technologies MT has a great impact on the development of new and better products, on the conservation of the environment, on the paint industry and medicine, among others. In the food industry MT are applied in a variety of areas, for example, in seawater desalination, wastewater treatment and juice clarification. In the case of dairy products, it has been used in the production of new derivatives, as in the case of whey proteins or lactose. In the present review, the use of Ultrafiltration (UF) was studied. A special emphasis is placed on the dairy industry, which outlines

the growing boom of MT, thanks to the fact that it allows the retention and separation of particles, is environmentally friendly and allows the development of new foods. Finally, it is essential to continue searching for alternatives to control the clogging of the membranes, extending the useful life of these materials, since it is the phenomenon that affects them the most.

**Key words**—Membrane technology, ultrafiltration, separation, whey protein.

**Resumo**— As Tecnologias de Membranas TM têm uma grande incidência no desenvolvimento de produtos novos e melhores, na conservação do meio ambiente, na indústria de tintas e medicamentos, entre outros. Na indústria alimentar, as TM são aplicadas em diversas áreas, por exemplo, na dessalinização da água do mar, no tratamento de águas residuais e na clarificação de sucos. No caso dos produtos lácteos, tem sido utilizado na produção de novos derivados, como no caso das proteínas do soro lácteo ou da lactose. Na presente revisão, foi estudado o uso de Ultrafiltração UF. É dada especial ênfase na indústria láctea, onde se esboça o crescente auge das TM, graças ao fato de que permite a retenção e separação de partículas, por ser ambientalmente amigável e por permitir o desenvolvimento de novos alimentos. Finalmente, é indispensável continuar buscando alternativas para controlar a colmatação das membranas, estendendo a vida útil desses materiais, pois é o fenômeno que mais os afeta.

**Palavras-chave**— tecnologia de membrana, ultrafiltração, separação, proteína de soro de leite.

### I. INTRODUCCIÓN

La tecnología de membranas (TM) es un método de filtración de solutos disueltos en un fluido, cuyo fundamento es la separación por la diferencia de los pesos moleculares y el tamaño de partícula [1]. La tecnología de membranas (TM) ofrece ventajas significativas en la industria en general, debido a que: 1) la separación se realiza de forma continua, 2) el consumo de energía es pequeño, 3) los procesos son fácilmente combinables con otros procesos de separación, 4) el escalado de los procesos es sencillo, 5)

<sup>1</sup>Producto de investigación del Grupo de Investigación Ingeniería de Procesos Agroalimentarios y Biotecnológicos (GIPAB), de Escuela de Ingeniería de Alimentos de la Universidad del Valle.

C.A. Solís-Carvajal, es Ingeniero de Alimentos, Escuela de Ingeniería de Alimentos, de la Universidad del Valle, Cali (Colombia).

C.A. Vélez Pasos, es Director de la Escuela de Ingeniería de Alimentos, de la Universidad del Valle, Cali (Colombia).

J.S. Ramírez-Navas es Profesor Asistente (DOMT) en la Escuela de Ingeniería de Alimentos, de la Universidad del Valle, Cali (Colombia). email: [juan.sebastian.ramirez@correounivalle.edu.co](mailto:juan.sebastian.ramirez@correounivalle.edu.co)

las propiedades de las membranas son ajustables, 6) no es preciso añadir aditivos, 7) se recuperan productos de valor, 8) se requieren bajos costos de inversión, y 9) se reduce la emisión de residuos que atentan contra el medio ambiente [2-5]

El desarrollo de las membranas, debido a su gran capacidad para seleccionar, según el peso molecular, los solutos disueltos en una corriente líquida, ha optimizado diversos procesos industriales, tal como la desalinización del agua de mar, el aprovechamiento de los componentes de leche y lactosuero, el mejoramiento de las pinturas, la obtención de compuestos activos en la industria farmacéutica, entre otros. [6]. Sin embargo, el principal limitante para la implantación de las TM a escala industrial es la reducción continua del flujo de permeado con respecto al tiempo. En la mayoría de los casos, el flujo de permeado disminuye hasta un nivel tan bajo que obliga a detener el proceso de microfiltración, con el fin de llevar a cabo una serie de lavados con químicos fuertes a altas temperaturas (60°C a 80°C), para recuperar la permeabilidad de las membranas y asegurar la obtención de altos flujos. Dichos lavados pueden modificar la estructura y composición química de las membranas, y hacen que los procesos membranarios, a escala industrial, sean costosos debido a que se aumentan los tiempos de producción y en algunos casos obliga a la adquisición de nuevas membranas [5].

El fin de esta revisión es presentar al lector una visión general de la tecnología de membranas haciendo énfasis en la ultrafiltración. Adicionalmente, se presentan algunos ejemplos de su aplicación en la industria láctea.

## II TECNOLOGÍA DE MEMBRANAS (TM)

Existen membranas biológicas y sintéticas [7]. Las primeras pueden ser vivas o no y son usadas en el campo médico y farmacéutico [8]. Mientras que las segundas se clasifican en poliméricas, líquidas, compuestas e inorgánicas [9].

Las membranas líquidas constituyen una familia especial de membranas, debido a que el material que ejerce de barrera entre dos fluidos es otro fluido [10], presentan gran interés en el campo de la separación de gases [11]. Las poliméricas, pueden ser macroscópicas o microscópicas, simétricas o asimétricas y porosas o no porosas [12], son de gran interés en la industria del lactosuero y la industria de pinturas [13], la ventaja de estas membranas radica en que mejoran la fortaleza mecánica del material sin sacrificar las características más importantes del polímero, necesarias para funcionar en los procesos de separación [8]. Las membranas compuestas, son membranas que poseen capas química o estructuralmente diferentes [14], presentan interés en la industria de los hidrocarburos [15]. Las membranas inorgánicas se usan en la separación de iones monovalentes y divalentes de soluciones acuosas [16], estas membranas son muy estables química y térmicamente, exhiben una alta resistencia a la presión y son inertes ante la degradación microbiológica [9], sin embargo, su uso a nivel industrial es limitado debido a su fragilidad y a su baja relación superficie/volumen [17].

Las membranas también pueden clasificarse por las fuerzas directoras empleadas y por el tipo de sustancias separadas [8]. A continuación se presentan dos formas de clasificación de las membranas, según su naturaleza (Tabla I) y según su estructura (Tabla II) [18].

TABLA I.  
CLASIFICACIÓN DE LAS MEMBRANAS SEGÚN SU NATURALEZA

Naturaleza	Biológica	Vivas (Bicapas lipídicas)		
		No vivas (Arcillas)		
	Sintética	Inorgánicas	Metálicas	
			Vitreas	
Poliméricas		Polímeros funcionalizados		
Líquidas	Polímeros no funcionalizados			
	Compuestas	De Volumen		
		De Emulsión		
Soportadas				
		Por capas superpuestas		
		Por inclusión		
		Por mezclas de polímeros		

Fuente: Hernández, et al. [18]

TABLA II.  
CLASIFICACIÓN DE LAS MEMBRANAS SEGÚN SU ESTRUCTURA

Estructura	Macroscópica	Laminares		
		Tubulares		
	Microscópica	Según porosidad	Fibras huecas	
			Densas	
Según configuración		Porosas	Microporosas	
			Mesoporosas	
			Macroporosas	
			Simétricas	
			Asimétricas	

Fuente: Hernández, et al. [18]

### A. Clasificación de los procesos con membranas

Los procesos de separación por membrana se clasifican de acuerdo al tamaño de las partículas o moléculas que son capaces de retener: microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, osmosis inversa y electrodiálisis (Fig 1) [19]. Así se tiene:

**Microfiltración (MF):** separa partículas con un tamaño comprendido entre 0,05 y 10  $\mu\text{m}$ , a presiones comprendidas entre los 0,5 y 3 bar. Usualmente se usa para retener sólidos en suspensión: por lo tanto, se emplea como etapa de limpieza, de concentración o como pretratamiento para la nanofiltración o a la ósmosis inversa [19].

**Ultrafiltración (UF):** concentra grandes moléculas y macromoléculas de peso molecular entre 1000 y 200,000 Da; por lo cual la membrana tiene un diámetro aproximado de poro de 0,01  $\mu\text{m}$ . Se realiza a valores de presión inferiores 1000 kPa [20].

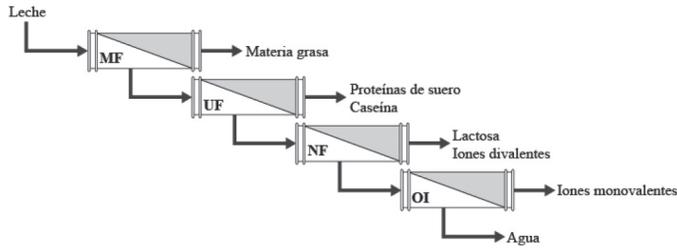


Fig 1. Proceso de separación por membranas de leche.

*Osmosis inversa* (OI): Concentra soluciones por eliminación de agua; el tamaño del poro se encuentra entre 5 – 15 Å permitiendo obtener retenidos con un contenido máximo de sólidos del 30% [21]

*Nanofiltración* (NF): separa partículas con diámetro de poro inferior a  $0,001\mu\text{m}$  (1nm). Retiene lactosa y otros componentes de gran tamaño, permitiendo permear sólo iones minerales monovalentes y agua [22].

*Electrodialisis* (ED): proceso de membrana para separar iones cargados eléctricamente, mediante la aplicación de un campo eléctrico [22].

De los diferentes procesos con membranas, la UF es el tipo de proceso por excelencia empleado para separar las principales proteínas del lactosuero. Por esta razón, se han realizado muchas investigaciones para encontrar las mejores condiciones de proceso orientadas a mejorar el rendimiento y la capacidad del sistema.

### III. ULTRAFILTRACIÓN

Esta operación se usa para separar polímeros y almidones, dispersiones coloidales de arcillas, partículas de látex, microorganismos y mezclas de proteínas de diferentes pesos moleculares. El límite del peso molecular de la membrana se define como el peso molecular de las proteínas globulares que

son retenidas en un 90% por la membrana. La regla general (regla del dedo pulgar) es que la masa molecular debe diferir por un factor de 10 para lograr una buena separación [23].

Las moléculas que no atraviesan la membrana se conocen como material retenido o concentrado. Los materiales disueltos de bajo peso molecular como disolventes, sales, azúcares y agua pasan a través de la membrana por acción de una fuerza impulsora de presión hidrostática relativamente baja (1- 10 bar); esta corriente que se forma se conoce como permeado o filtrado [24]. En la Fig 2 se representa el proceso general de separación a través de una membrana semipermeable:

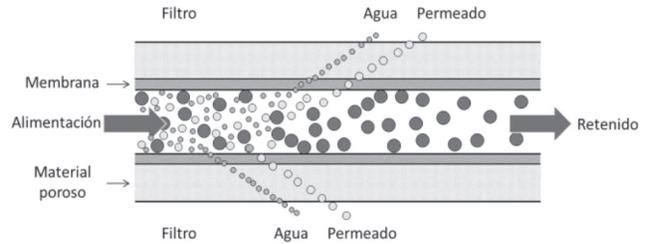


Fig 2. Esquema de la separación con membranas.

Una de las principales limitantes que presentan las membranas de UF es su precio, que, aunque se ha reducido considerablemente en los últimos años, sigue siendo muy elevado. Esto conlleva a que cualquier intento de incorporar un equipo de filtración selectiva a la fabricación de un producto, se vea acompañado de una gran inversión económica que no siempre es rentable.

Los tipos de membranas de UF fabricados son del tipo hoja plana, membrana tubular y membrana de fibra hueca. En las Tabla III y Tabla IV se listan algunas especificaciones de las membranas de UF[25].

TABLA III.  
MÓDULOS DE UF DE FLUJO TANGENCIAL

Nombre	Material membrana	Material cubierta	Área m(m <sup>2</sup> )
Minimate TTF	Polietersulfonamod	Polipropileno	0,005
Centramate	Polietersulfonamod	Poliester, Poliolefina, Poliuretano	0,09
Centrasette	Polietersulfonamod	Poliester, Poliulefina, Poliuretano	0,46
Prostak	Polietersulfona	polivinilfluorideno (PVDF)	0,39
	celulosa regenerada	Acero inox.	0,93

Fuente: Ghosh [25]

TABLA IV.  
CARACTERÍSTICAS DE MEMBRANAS DE UF

Membrana	Material	MWCO (Da)	ZP a pH 7 (mV)	Ángulo de contacto en la limpieza de la membrana (°)	PWP (L/d-m <sup>2</sup> -kPa)
GM	Sulfona	200	-11.5	60	2.13
NTR7410	Sulfona	20	-22.6	55	7.75
10PESUF40	Polietersulfona	10	-13.1	59	29.4
PM10	Polietersulfona	8	-17.0	45	2.37

Zp: Determinación del potencial Z, PWP: Permeabilidad del agua pura, MWCO: Peso molecular

Fuente: Yoon, et al. [26]

### A. Flujo de permeado de la UF

El desarrollo de modelos que intentan predecir el comportamiento del proceso de filtración se basa en la relación entre la presión aplicada y la tasa de permeación (flujo de permeado). En una membrana ideal con poros uniformemente distribuidos y de igual tamaño, sin polarización de la concentración ni taponamientos y presión osmótica despreciable el flujo del fluido a través de la membrana puede ser descrito por la siguiente expresión:

$$J = \frac{TMP}{\mu R_m}$$

#### Ec. 1. Flujo de permeado

Fuente: Mohammadi et al. [2005]

Donde J es el flux (flujo volumétrico por unidad de área), TMP es la presión transmembranaria y  $\mu$  es la viscosidad del solvente.

De acuerdo a esta ecuación el flujo a través de la membrana es directamente proporcional a la presión aplicada e inversamente proporcional a la viscosidad del fluido, sin embargo, las consideraciones enunciadas sólo se aplican para la filtración de un solvente o de soluciones de baja concentración de solutos con regímenes de flujos turbulentos y bajas presiones de operación [27]. Cuando el proceso de filtración implica corrientes de alimentación con solutos, la ecuación más adecuada es conocida como el modelo de la presión osmótica:

$$J = \frac{|\Delta P| - |\Delta \pi|}{\mu (R_m - R_s)}$$

#### Ec. 2. Modelo de la presión osmótica

Fuente: Bowen and Jenner [28]

Donde  $\Delta \pi$  es la diferencia entre la presión osmótica a través de la membrana y  $R_s$  representa la torta de filtro reversible y a veces irreversible (cuando se trata de incrustaciones) deposición de solutos (o solidos) sobre la superficie de la membrana.

En la literatura, se encuentran adicionalmente a este último modelo, varios otros que intentan predecir el flux de

permeado con una mayor aproximación a la realidad. Entre estos tenemos:

#### 1) Modelo de polarización de gel

Cuando aumenta la presión aumenta temporalmente el flujo y por ende aumenta el crecimiento del espesor de la capa de gel (aumento de la presión hidráulica), para finalmente reducir el flujo de fluido inicial [29]. El fenómeno anterior para un rechazo del 100% de soluto ( $c_p = 0$ ) se expresa con la relación:

$$J_{lim} = \kappa_s \ln \left( \frac{c_g}{c_b} \right)$$

#### Ec. 3. Modelo de polarización de gel

Fuente: Shirazi, et al. [29]

Donde  $C_m$  ha sido reemplazada por la constante de concentración de gel  $c_g$  y  $J_{lim}$  es el flujo crítico.

#### 2) Modelo de resistencia en serie

Este modelo se obtiene como resultado de múltiples transformaciones del modelo de presión osmótica:

$$\frac{t}{V} = \frac{\mu R_m}{A_m |\Delta P|} + \frac{\mu \alpha c_b}{A_m^2 |\Delta P|} V$$

#### Ec. 4. Modelo de resistencia en serie

Fuente: Mohammadi et al. [2005]

De la ecuación anterior se obtiene una línea recta a partir del trazado de los datos experimentales de  $t/V$  frente a  $V$  con lo cual se determina la resistencia específica  $\alpha$  y la resistencia de la membrana [30].

### B. Factores que afectan el flujo de permeado

El flujo de permeado en un proceso de UF de LS se perturba principalmente por el pH, la presión transmembranaria (PTM), el material de construcción de la membrana, la orientación del flujo de filtrado y la concentración de solutos retenidos. En la Tabla V se presenta una lista de valores asignados a estos factores en el fraccionamiento de LS empleando UF:

TABLA V.  
PARÁMETROS USADOS EN EL FRACCIONAMIENTO DE LAS PROTEÍNAS DEL LACTOSUERO

pH	$\Delta P$ (bar)	(kDa)	Kg/mol	Material	°C	Referencia
10	1	300		Cerámica	30	Almécija, et al. [31]
8	0,75	5		Polietersulfona	37	Fernández, et al. [32]
7	1,5		36.6	Membranas Inorgánicas Modificadas (Poliétilenimina)	50	Lucas, et al. [33]
5,6	4		30	Celulosa regenerada	20	Bhattacharjee, et al. [34]
4,3	2	300		Celulosa regenerada	22	Arunkumar and Etzel [35]
4,3	0,3			Celulosa regenerada	40	Metsämuuronen and Nyström [36]
4	0,34	30		Celulosa regenerada	22	Bhushan and Etzel [37]
2,8	4		10	Polietersulfona	20	Bhattacharjee, et al. [34]
1-13	1-5	6-8		Polivinil- difluoruro	30-50	Atra, et al. [38]

A continuación, se describen los factores mencionados.

#### 1) pH

El pH de la corriente de alimentación es uno de los factores más importantes en el incremento del coeficiente de ensuciamiento (CE) y en el desarrollo del fenómeno de polarización por concentración (CP); los cuales son los principales responsables de la reducción del flujo de permeado [27]. Así la tendencia al ensuciamiento de la membrana se reduce cuando el pH de la solución es básico gracias a que ocurre una repulsión electrostática entre los péptidos, los cuales tienen una carga eléctrica negativa y un punto isoeléctrico bajo [32].

#### 2) Presión transmembranaria

La PTM interviene en la polarización por concentración y la velocidad de flujo en un sistema de UF [39], por eso al aumentar la PTM aumenta la tasa de flujo y la resistencia de la membrana, reflejándose en la formación de una torta de partículas colmatantes que reducen la permeabilidad y el rendimiento del sistema; es decir, entre mayor sea la presión aplicada, mayor será la cantidad de partículas que se depositan sobre el interior de los poros [40]. Para disminuir el efecto de la PTM se realizan procesos previos de limpieza de líquido a filtrar, tales como la MF que logra remover fragmentos de grasa residual, lipoproteína y agregados de proteínas que aceleran la colmatación del equipo de UF [41].

#### 3) Material de construcción del equipo de UF

El material de construcción del equipo de UF repercute en el taponamiento de los poros, por ello los materiales más usados en UF son los poliméricos porque son de carácter hidrofílico y tienen una carga eléctrica negativa que coincide con la carga eléctrica de muchas macropartículas disueltas en el LS. Por ende, los materiales poliméricos no favorecen la colmatación de la membrana [40].

#### 4) Orientación de la corriente de alimentación

La orientación del flujo de alimentación es un factor técnico importante en la estabilidad del equipo. Como consecuencia de ello, cuando la filtración se realiza en dirección perpendicular a la superficie membranaria, la colmatación de la película se hace evidente con la reducción del flujo de permeado a pocos minutos de iniciado el proceso, mientras que si la orientación del flujo filtrante es paralelo no se percibe descenso en el flujo de permeado y no se afecta la permeabilidad de la membrana [5].

Otro método que se usa a menudo es hacer circular una corriente de agua en sentido opuesto al flujo de alimentación para eliminar los residuos depositados sobre la membrana, aunque este método no es cien por ciento efectivo ya que no garantiza la remoción del total de la película formada [9]. Equivalentes resultados se obtienen cuando se mantiene constante la presión de operación del sistema o el flujo de filtrado; sin embargo, estas dos últimas metodologías pueden tener efectos adversos en la calidad del producto, rendimiento y reproducibilidad del proceso [42].

Teniendo en cuenta los factores antes mencionados, es posible reducir el fenómeno de concentración por polarización y el ensuciamiento de la membrana, si se usan espaciadores en su interior (promotores de turbulencia), u obstáculos al flujo normal de permeado que reducen la deposición de partículas sobre la superficie y el interior del equipo y mantienen constante la concentración de los solutos retenidos. En la Fig 3 se presentan los espaciadores descritos:



Fig 3. Corriente de alimentación a través de una membrana con espaciadores.

Fuente: Baker [9]

### 5) Concentración de solutos retenidos

La acumulación de solutos ocurre en la superficie de la membrana donde se lleva a cabo la filtración de solutos, éste efecto se conoce como polarización por concentración (ver Fig 4). Cuando la concentración de solutos aumenta éstos tienden a atravesar la membrana de acuerdo a la ley de difusión de Fick. A continuación se presenta un balance de masa bajo condiciones ideales, (densidades similares entre solvente y soluto, coeficiente de difusión constante, gradientes de concentración paralelos a la membrana y de concentración despreciable frente a los gradientes ortogonales)[28].

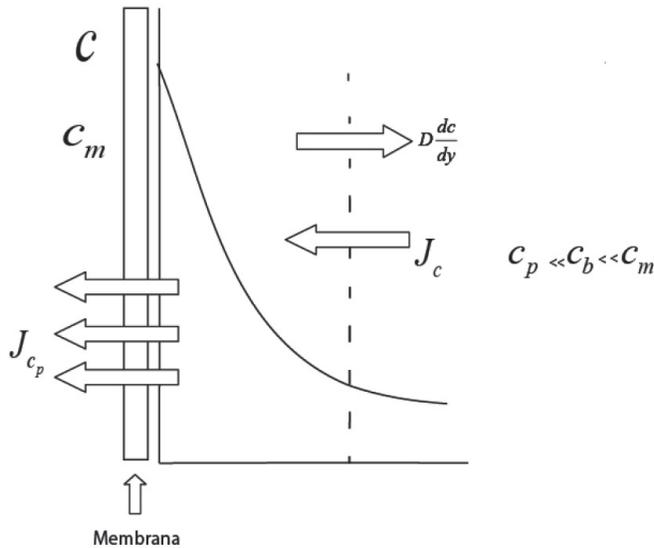


Fig 4. Concentración por polarización en una membrana de UF

Fuente: Bowen and Jenner [28]

La Fig 4. Concentración por polarización en una membrana de UF se puede interpretar mediante la expresión:

$$J_c = D \frac{dc}{dy} + J_{c_p}$$

#### Ec. 5. Modelo de filtración

Fuente: Bowen and Jenner [28]

Donde  $C$  y  $C_p$  son la concentración de solutos en la capa límite y en el permeado, respectivamente y  $D$  es el coeficiente de difusión de los solutos en el solvente.

Integrando la ecuación anterior al ajustarla a las condiciones de frontera:  $c(y=\delta) = c_b$  y  $c(y=0) = c_m$ . Se obtiene la relación conocida como el modelo de película:

$$J = \kappa_s \ln \frac{c_m - c_p}{c_b - c_p}$$

#### Ec. 6. Modelo de película

Fuente: Perkins, et al. [43]

Donde,  $\kappa_s$  es el coeficiente global de transferencia de masa y representa la relación entre el coeficiente de difusión y la densidad,  $c_m$  es la concentración en la superficie de la membrana.

El coeficiente global de transferencia de masa usualmente se obtiene a partir del número de Sherwood:

$$Sh = \frac{\kappa_s d_h}{D} = KR_e^a S^b \left( \frac{d_h}{L} \right)^c$$

#### Ec. 7. Número de sherwood

Fuente: García-Martín, et al. [44]

Donde las constantes  $K$ ,  $a$ ,  $b$  y  $c$  varían con el régimen de flujo.

## IV. DIMENSIONAMIENTO DE PLANTAS DE UF

Seleccionar correctamente la membrana a utilizar y dimensionar adecuadamente el equipo de UF asegura el éxito de la incorporación de un equipo de filtración selectiva a un proceso de fabricación.

### A. Elección del tipo de membrana

En el mercado existe un gran número de fabricantes de membranas de UF. Sin embargo, al seleccionar una membrana para un proceso de separación de LS por UF se pueden emplear membranas poliméricas o membranas inorgánicas.

Las membranas poliméricas son las más utilizadas en la actualidad [45]. Las configuraciones más comunes son las de tipo espiral y *plate and frame*. Estas membranas tienen algunos inconvenientes, entre ellos que su duración es limitada (aproximadamente un año), y que se pueden emplear en industria láctea para concentrar LS y leche pero no a altas viscosidades. Por otra parte, la ventaja que presentan es que requieren menos superficie en planta para la misma superficie filtrante.

Una aplicación de éste tipo de membranas es en la retención de  $\beta$ -galactosidasa para obtener galacto-oligosacáridos de la lactosa [46] o en la ultrafiltración de lechada descremada de coco mediante una membrana de polisulfona de 10 y 20 kDa [47].

Crowley, et al. [48] usaron una membrana polimérica de polietersulfona de (1000 kDa para estudiar el fraccionamiento de las proteínas durante la filtración de leche desnatada, obteniendo una buena cantidad de  $\beta$ -Caseína y componentes menores de las proteínas del suero como por ejemplo la lactoferrina.

Las membranas inorgánicas son mucho mejores que las poliméricas, ya que se trata de membranas con una gran resistencia y durabilidad (aproximadamente 5 años). Se pueden utilizar hasta factores de concentración muy altos o en el tratamiento de fluidos viscosos. Sin embargo, el alto precio ha limitado su expansión, en muchos casos es 10 veces mayor al de las poliméricas.

Estudios recientes han mostrado que el uso de membranas híbridas (inorgánicas y orgánicas), tienen un gran rendimiento en la separación de proteínas, puesto que además de permitir la adición en su estructura, de una carga negativa que mejora la capacidad de hidrofobicidad y porosidad, reducen el nivel de ensuciamiento de la membrana. Además presentan una mayor durabilidad al uso de materiales de limpieza durante

su lavado, obteniéndose una recuperación de flujo o flujo de filtración elevado [49].

El uso de membranas inorgánicas permite mayor facilidad en los procesos de limpieza debido a que tienen una mejor resistencia a los compuestos químicos que las membranas orgánicas, recuperando al final del proceso el flujo de permeado inicial [50].

### B. Elección del tipo de equipo

Los equipos de UF se pueden dividir en dos clases; equipos de funcionamiento discontinuo y equipos de funcionamiento continuo.

Los equipos de funcionamiento discontinuo trabajan por lotes y generalmente se emplean a escala piloto o en laboratorios de investigación y desarrollo. En estos equipos la materia prima almacenada en un tanque se bombea hasta el UF donde se separan dos corrientes, el retenido y el concentrado. Este último es enviado de nuevo al tanque de almacenamiento con el fin de alcanzar el grado de concentración deseado. Al trabajar con este tipo de equipos, se recomienda: 1) limitar el tiempo de concentración a dos horas aproximadamente, con el fin de evitar el desarrollo microbiano en el concentrado y el deterioro de la calidad del producto; 2) trabajar con temperaturas cercanas a 50°C pero que no superen los 60°C para evitar la desnaturación de proteínas solubles, lo que podría incrementar el ensuciamiento de la membrana y generar pérdida de calidad del producto.

Los equipos de funcionamiento continuo son los utilizados a nivel industrial. En estos la materia prima y el producto final circulan continuamente. En el caso del producto, la calidad aumenta ya que el tiempo de permanencia en el equipo es menor al anterior. Este tipo de equipos se caracterizan por estar formados por varias etapas. El proceso es sencillo, la materia prima se bombea al UF, donde circula por las distintas etapas en las cuales se va concentrando, hasta el punto de concentración adecuada. Entre las características a considerar en el diseño y correcto funcionamiento de este tipo de equipos están el ensuciamiento de la membrana y el control del factor de concentración.

La elección entre este tipo de equipos depende de un gran número de factores, tales como: 1) proceso en el que va a ser integrado el equipo, 2) simplicidad de las instalaciones, 3) automatización de los equipos de UF.

### C. Modos de operación

Los sistemas de separación por membranas pueden organizarse de diversos modos de funcionamiento, dependiendo de las características deseadas del producto final y del sistema, tales como la cantidad de membrana disponible, el volumen de alimentación, el factor de concentración requerido, el tiempo deseado de residencia del producto y el equipo auxiliar disponible. Los sistemas de separación pueden operar en modo discontinuo o continuo [51].

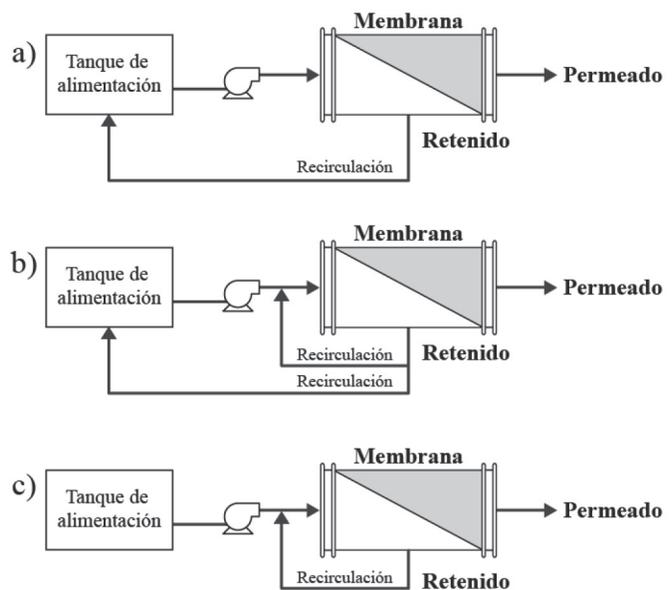


Fig 5. Arreglos discontinuos de membranas de filtración: a) diseño completamente recirculado, b) diseño parcialmente recirculado, c) diseño sin salida. Modificado de: Smith [51].

#### 1) Modo discontinuo (por lotes)

Se caracteriza porque la corriente de alimentación permanece dentro del sistema hasta que todo el retenido ha alcanzado la concentración o pureza deseada. Sólo la corriente de permeado se elimina del proceso. Por lo tanto, existen varios tipos de diseños de operaciones por lotes. El retenido puede ser completamente recirculado, parcialmente recirculado o el sistema puede ser operado en un diseño sin salida (ver Fig 5).

En todos los casos, la corriente de retenido se recircula hasta que se alcanza la concentración de producto final deseada. Las ventajas del diseño del lote en comparación con los sistemas continuos incluyen: menor inversión de capital, sistema de válvulas menos complejo, mayores rendimientos, y tasas de flujo promedio más altas.

#### 2) Modo continuo

A diferencia del diseño por lotes, en el modo continuo, parte del retenido es retirado continuamente del proceso (ver Fig 6). Sin embargo, el permeado se retira continuamente, de forma similar a los procesos discontinuos. Los diseños continuos son más adecuados para operaciones comerciales donde se procesan grandes volúmenes de material. Una consideración importante de seguridad microbiológica es el tiempo de residencia disminuido para el material en una operación continua en comparación con un diseño de lote.

## V. APLICACIONES

Las aplicaciones de la TM en la industria lechera se remontan a finales de los años 60 con la concentración de proteínas de la leche usando el proceso MMV, nombrado en honor a sus inventores (Maubois, Mocquot y Vassal). Simultáneamente, se aplicó TM al procesamiento de LS

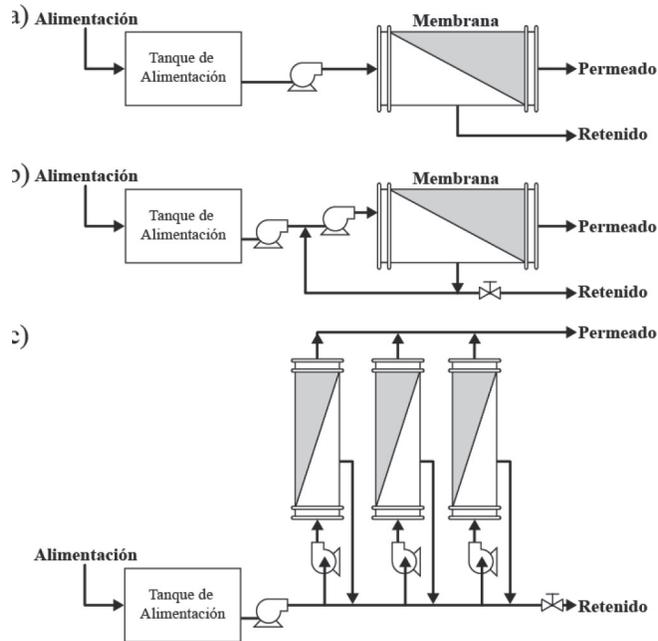


Fig 6. Arreglos continuos de membranas de filtración: a) diseño de paso simple, b) diseño parcialmente recirculado, c) diseño multietapa. Modificado de: Smith [51].

logrando la producción de concentrados de proteínas y, por lo tanto, la transformación de un subproducto residual de la producción de queso en productos valiosos. Desde entonces, el desarrollo de aplicaciones de la TM en el sector lácteo se ha relacionado más o menos estrechamente con el progreso en las operaciones de membrana [6, 52, 53].

### 1) Estandarización de proteínas por ultrafiltración

La UF permite concentrar todas las proteínas de la leche (proteínas séricas y caseínas) y el contenido de grasa, y simultáneamente permitir que la lactosa y los minerales pasen a través de la membrana. El objetivo principal de la estandarización de las proteínas (ver Fig 7) es superar las variaciones diarias inherentes a la composición de la leche, resultando en beneficios nutricionales, tecnológicos y económicos significativos. El proceso de UF puede realizarse para normalizar la concentración de proteína o para reducir el contenido de proteína de la leche por adición de permeado ultrafiltrado. Este proceso no se practica ampliamente en la leche de consumo directo porque todavía está siendo debatido por los organismos reguladores. Sin embargo, sí se aplica en la industria quesera, donde se ha observado que bajas concentraciones de proteínas séricas en el proceso de fabricación del queso es ventajoso ya que reduce los defectos de sabor y textura atribuidos a las proteínas del LS y reduce también los efectos perjudiciales del tratamiento térmico sobre la coagulabilidad de la leche [5, 21, 52, 54].

### 2) Elaboración de yogur

El uso de leche enriquecida por adición del retenido de la UF en la elaboración del yogur genera productos con mejor textura (más lisa y cremosa) y apariencia (aspecto más brillante) [55].

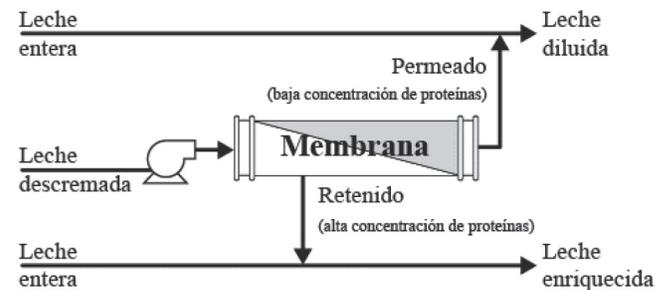


Fig 7. Proceso de estandarización de proteínas mediante ultrafiltración. Modificado de: Gésan-Guiziu [52].

### 3) Elaboración de queso

El uso de leche enriquecida (3,7 a 4,5 g de proteína por 100 g<sup>-1</sup> de leche) por adición del retenido de la UF en la elaboración de quesos permite 1) uniformidad en la composición de la leche; 2) cuajadas firmes y, por lo tanto, menores pérdidas de finos de caseína; 3) aumento del rendimiento del queso; 4) mejora de la eficiencia en el queso (más queso por cuba). El aumento del rendimiento de queso se atribuye a una mayor recuperación de grasa y proteínas y la retención de algunas proteínas del suero de leche. La UF se ha empleado para estandarizar leches destinadas a la elaboración de quesos, como Camembert, Cheddar, Mozzarella y muchas otras variedades de queso [56].

### 4) Fraccionamiento de proteínas de lactosuero

La UF fue uno de los primeros y más comunes procesos de TM utilizados con éxito en la industria del LS [6, 53]. Se utiliza principalmente: 1) para fraccionar y concentrar el LS en WPC y permeado rico en lactosa, que puede procesarse posteriormente para recuperar la lactosa; 2) preconcentrar el permeado rico en lactosa obtenido de la producción de WPC para la producción de lactosa; 3) descalcificar el permeado obtenido de la producción de WPC, haciendo que el permeado sea adecuado para la concentración por otros procesos, tales como OI; 4) como tratamiento secundario a la MF de LS [57].

Konrad and Kleinschmidt [58], a partir de suero dulce, lograron extraer  $\alpha$ -la, entre el 36 y el 44% de pureza. Luego de someter la corriente de alimentación a procesos previos de limpieza tal como la DF. Las variables de proceso usadas fueron pH de 6.7, temperatura de 45°C y PTM de 2 bares, la investigación concluyó que el pH es el factor determinante en el aislamiento de la proteína en cuestión.

Por otra parte, Lucas, et al. [33], demostraron que se puede separar la  $\alpha$ -la de la  $\beta$ -lg, a partir de proteínas concentradas de suero (CPL 90%) mediante una membrana inorgánica de UF modificada químicamente con polietiliminina (40000 g mol<sup>-1</sup>) a pH neutro. Dicha membrana adquiere una carga iónica positiva que le permite interactuar fuertemente con la  $\beta$ -lg; permitiendo así separarla de la  $\alpha$ -la.

### 5) Otras aplicaciones

Se ha demostrado que las TM pueden ser utilizadas en la industria de alimentos y bebidas para la clarificación, pasteurización y esterilización de jugos de frutas que se puede

adicionar a bebidas o yogurts [59], para la pasteurización y esterilización de leche, para el fraccionamiento de las proteínas del suero [60-62], entre otros. La UF se está usando en la detección del antibiótico Novobiocina en pollos, tejido de pescados y en suero humano [63].

Estudios recientes muestran que la UF tiene gran potencial para mejorar la biodisponibilidad de Zn, Mg, Ca y P en las leches fermentadas de cabra con la adición de prebiótico *Lactobacillus plantarum*, esto permitirá que se amplíen los estudios en este campo para lograr elaborar alimentos más nutritivos [64].

También se está evaluando el uso de la UF en la elaboración de alimentos para niños lactantes, debido a que ha demostrado proveer valores altos en la obtención de nutrientes y iones (calcio, fósforo y sodio) a partir de la leche bobina [65].

Con el fin de lograr una mejor calidad en la leche bobina libre de antibióticos tales como: la Tetraciclina, Oxitetraciclina, Clorotetraciclina y Doxiciclina; la UF centrífuga constituye un método promisorio para obtener leches más saludables para consumo humano [66]. Otra aplicación de la UF es en la clarificación de lodos y aguas en las bio y agro industrias, este estudio se logra combinando la UF de flujo cruzado con la técnica del Ultrasonido [67].

## VI. CONCLUSIONES

Debido a la demanda actual del consumidor, por alimentos más nutritivos y saludables, la UF emerge como una alternativa viable para mejorar los alimentos hoy en día, en especial los lácteos y sus derivados para obtener de ellos sus mejores propiedades benéficas para la nutrición y salud humana, relegando los componentes perjudiciales para la salud como son: virus, bacterias, hongos y antibióticos.

Debido al gran interés científico en los procesos con membranas, frente a la obtención de alimentos más saludables, se logrará mejorar la calidad de los mismos y su biodisponibilidad en nuestro organismo, dando paso, posiblemente, a su empleo sinérgico con la biotecnología, en el desarrollo de alimentos inteligentes que contengan un agente con un efecto benéfico específico para mejorar algún tipo de enfermedad.

Según la literatura revisada la UF puede ser usada en alimentos como: pescados, pollos e incluso en el suero humano, entre otros. Lo que demuestra que este método tiene un sin número de posibilidades de aplicación con beneficios promisorios, por lo tanto, es indispensable que se siga estudiando la aplicación de este método en la obtención de mejores productos.

Ya que los procesos de filtración por membranas se realizan a temperatura ambiente se reduce el consumo energético.

Finalmente es indispensable seguir buscando alternativas para controlar la colmatación de las membranas logrando extender la vida útil de estos materiales luego que es el fenómeno que más afecta las TM.

## REFERENCIAS

- [1] H. Muñoz Guerrero, "Gestión medioambiental de salmueras de desalado de bacalao. Tratamiento mediante tecnología de membranas," Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València, València, España, 2010.
- [2] K. J. Hwang and T. T. Lin, "Effect of morphology of polymeric membrane on the performance of cross-flow microfiltration," *Journal of Membrane Science*, vol. 199, pp. 41-52, 2002.
- [3] M. Mulder, *Basic Principles of Membrane Technology*, 2nd ed. London, UK, 1996.
- [4] F. Vaillant, A. Millan, M. Dornier, M. Decloux, and M. Reynes, "Strategy for economical optimisation of the clarification of pulpy fruit juices using crossflow microfiltration," *Journal of Food Engineering*, vol. 48, pp. 83-90, 2001.
- [5] H. L. Gallego Ocampo, "Factores que influyen en la colmatación de membranas de microfiltración tangencial y representación matemática," *Revista RECITEIA*, vol. 11, pp. 187-210, 2011.
- [6] C. Solís, C. Vélez, and J. S. Ramírez-Navas, "Tecnología de membranas: desarrollo histórico," *Entre Ciencia e Ingeniería*, vol. 19, pp. 89-98, 2016.
- [7] P. Meares, "Material science of synthetic membranes: D. R. Lloyd (ed.) ACS symposium series no. 269, American Chemical Society, Washington, D.C., ix + 492 pages, US\$79.95, export US\$95.75 ISBN 0-8412-0887-5," *Polymer*, vol. 27, p. 1138, 7/1986.
- [8] A. Sotto Díaz, "Aplicación de la tecnología de membranas de nanofiltración y ósmosis inversa para el tratamiento de disoluciones acuosas de compuestos fenólicos y ácidos carboxílicos," Doctorado, Departamento de Tecnología Química y Ambiental, Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, España, 2008.
- [9] R. W. Baker, "Concentration Polarization," in *Membrane Technology and Applications*, ed: John Wiley & Sons, Ltd, 2004, pp. 161-190.
- [10] T. Araki and H. Tsukube, *Liquid membranes : chemical applications*. Boca Raton, Fla. USA: CRC Press, 1990.
- [11] L. Liang, Q. Gan, and P. Nancarrow, "Composite ionic liquid and polymer membranes for gas separation at elevated temperatures," *Journal of Membrane Science*, vol. 450, pp. 407-417, 1/15/ 2014.
- [12] L. M. Robeson, W. F. Burgoyne, M. Langsam, A. C. Savoca, and C. F. Tien, "High performance polymers for membrane separation," *Polymer*, vol. 35, pp. 4970-4978, 11/ 1994.
- [13] R. Ghosh and Z. F. Cui, *AIChE J.*, vol. 44, p. 61, 1998.
- [14] N. Lakshminarayanaiah and F. A. Siddiqi, "Studies with composite membranes. 3. Measurement of water permeability," *Biophys J*, vol. 12, pp. 540-51, May 1972.
- [15] P. Sukitpaneevit and T.-S. Chung, "Fabrication and use of hollow fiber thin film composite membranes for ethanol dehydration," *Journal of Membrane Science*, vol. 450, pp. 124-137, 1/15/ 2014.
- [16] M. Kumar, M. A. Khan, Z. A. AlOthman, and M. R. Siddiqui, "Polyaniline modified organic-inorganic hybrid cation-exchange membranes for the separation of monovalent and multivalent ions," *Desalination*, vol. 325, pp. 95-103, 9/16/ 2013.
- [17] R. R. Bhawe, J. Guibaud, B. T. De La Fuente, and V. Venkataraman, "Inorganic Membranes in Food and Biotechnology Applications," in *Inorganic Membranes Synthesis, Characteristics and Applications*, ed: Springer Netherlands, 1991, pp. 208-274.
- [18] A. Hernández, F. Tejerina, J. I. Arribas, L. Martínez, and F. Martínez, *Microfiltración, ultrafiltración y ósmosis inversa*. Murcia, España: Secretariado de Publicaciones de la Universidad de Murcia, 1990.
- [19] R. Ibañez Lorente, "Estudio de la Ultrafiltración de Proteínas Modelo con Membranas Cerámicas," Tesis de Doctorado, Universidad de Granada, Granada, España, 2007.
- [20] M. Rosenberg, "Current and future applications for membrane processes in the dairy industry," *Trends in Food Science & Technology*, vol. 6, pp. 12-19, 1/ 1995.
- [21] A. Chacón-Villalobos, "Tecnologías de membranas en la agroindustria láctea," *Agronomía Mesoamericana*, vol. 17, pp. 243-263, 2006.
- [22] A. F. de Carvalho and J. L. Maubois, *Engineering Aspects of Milk and Dairy Products*. Boca Raton, 2010.
- [23] C. J. Geankoplis, *Transport processes and separation process principles*, 4th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall Professional Technical Reference, 2003.
- [24] S. K. Sharma, S. J. Mulvaney, and S. S. H. Rizvi, *Food process*

- engineering : theory and laboratory experiments*. New York, USA: Wiley-Interscience, 2000.
- [25] R. Ghosh, "Biopharmaceutical Separations by Ultrafiltration," in *Advanced Membrane Technology and Applications*, ed: John Wiley & Sons, Inc., 2008, pp. 435-450.
- [26] Y. Yoon, G. Amy, J. Cho, and N. Her, "Effects of retained natural organic matter (NOM) on NOM rejection and membrane flux decline with nanofiltration and ultrafiltration," *Desalination*, vol. 173, pp. 209-221, 3/20/ 2005.
- [27] H. G. Ramachandra Rao, "Mechanisms of flux decline during ultrafiltration of dairy products and influence of pH on flux rates of whey and buttermilk," *Desalination*, vol. 144, pp. 319-324, 9/10/ 2002.
- [28] W. R. Bowen and F. Jenner, "Theoretical descriptions of membrane filtration of colloids and fine particles: An assessment and review," *Advances in Colloid and Interface Science*, vol. 56, pp. 141-200, 3/29/ 1995.
- [29] S. Shirazi, C.-J. Lin, and D. Chen, "Inorganic fouling of pressure-driven membrane processes — A critical review," *Desalination*, vol. 250, pp. 236-248, 1/1/ 2010.
- [30] T. Mohammadi, A. Kohpeyma, and M. Sadrzadeh, "Mathematical modeling of flux decline in ultrafiltration," *Desalination*, vol. 184, pp. 367-375, 11/1/ 2005.
- [31] M. C. Almécija, R. Ibáñez, A. Guadix, and E. M. Guadix, "Effect of pH on the fractionation of whey proteins with a ceramic ultrafiltration membrane," *Journal of Membrane Science*, vol. 288, pp. 28-35, 2007.
- [32] A. Fernández, A. Suárez, Y. Zhu, R. J. FitzGerald, and F. A. Riera, "Membrane fractionation of a  $\beta$ -lactoglobulin tryptic digest: Effect of the pH," *Journal of Food Engineering*, vol. 114, pp. 83-89, 1// 2013.
- [33] D. Lucas, M. Rabiller-Baudry, L. Millesime, B. Chaufer, and G. Daufin, "Extraction of  $\alpha$ -lactalbumin from whey protein concentrate with modified inorganic membranes," *Journal of Membrane Science*, vol. 148, pp. 1-12, 1998.
- [34] S. Bhattacharjee, C. Bhattacharjee, and S. Datta, "Studies on the fractionation of  $\beta$ -lactoglobulin from casein whey using ultrafiltration and ion-exchange membrane chromatography," *Journal of Membrane Science*, vol. 275, pp. 141-150, 4/20/ 2006.
- [35] A. Arunkumar and M. R. Etzel, "Fractionation of  $\alpha$ -lactalbumin from  $\beta$ -lactoglobulin using positively charged tangential flow ultrafiltration membranes," *Separation and Purification Technology*, vol. 105, pp. 121-128, 2/5/ 2013.
- [36] S. Metsämuuronen and M. Nyström, "Enrichment of  $\alpha$ -lactalbumin from diluted whey with polymeric ultrafiltration membranes," *Journal of Membrane Science*, vol. 337, pp. 248-256, 7/15/ 2009.
- [37] S. Bhushan and M. R. Etzel, "Charged Ultrafiltration Membranes Increase the Selectivity of Whey Protein Separations," *Journal of Food Science*, vol. 74, pp. E131-E139, 2009.
- [38] R. Atrá, G. Vatai, E. Bekassy-Molnar, and A. Balint, "Investigation of ultra- and nanofiltration for utilization of whey protein and lactose," *Journal of Food Engineering*, vol. 67, pp. 325-332, 4// 2005.
- [39] J.-H. Huang, S.-H. Guo, G.-M. Zeng, Y.-L. Xiong, D.-M. Zhang, X.-J. Tang, and G.-X. Xie, "Prediction of fouling resistance and permeate flux in cross-flow micellar-enhanced ultrafiltration (MEUF)," *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, vol. 401, pp. 81-89, 2012.
- [40] R. W. Baker, "Ultrafiltration," in *Membrane Technology and Applications*, ed: John Wiley & Sons, Ltd, 2012, pp. 253-302.
- [41] A. Muller, G. Daufin, and B. Chaufer, "Ultrafiltration modes of operation for the separation of  $\alpha$ -lactalbumin from acid casein whey," *Journal of Membrane Science*, vol. 153, pp. 9-21, 1999.
- [42] R. van Reis, E. M. Goodrich, C. L. Yson, L. N. Frautschy, R. Whiteley, and A. L. Zydney, "Constant Cwall ultrafiltration process control," *Journal of Membrane Science*, vol. 130, pp. 123-140, 1997.
- [43] T. W. Perkins, S. Saksena, and R. van Reis, "A dynamic film model for ultrafiltration," *Journal of Membrane Science*, vol. 158, pp. 243-256, 6/1/ 1999.
- [44] N. García-Martín, V. Silva, F. J. Carmona, L. Palacio, A. Hernández, and P. Prádanos, "Pore size analysis from retention of neutral solutes through nanofiltration membranes. The contribution of concentration-polarization," *Desalination*, vol. 344, pp. 1-11, 7/1/ 2014.
- [45] J. Vital and J. M. Sousa, "1 - Polymeric membranes for membrane reactors," in *Handbook of Membrane Reactors*. vol. 1, A. Basile, Ed., ed: Woodhead Publishing, 2013, pp. 3-41.
- [46] D. Sen, A. Sarkar, A. Gosling, S. L. Gras, G. W. Stevens, S. E. Kentish, P. K. Bhattacharya, A. R. Barber, and C. Bhattacharjee, "Feasibility study of enzyme immobilization on polymeric membrane: A case study with enzymatically galacto-oligosaccharides production from lactose," *Journal of Membrane Science*, vol. 378, pp. 471-478, 8/15/ 2011.
- [47] C. Y. Ng, A. W. Mohammad, L. Y. Ng, and J. M. Jahim, "Membrane fouling mechanisms during ultrafiltration of skimmed coconut milk," *Journal of Food Engineering*, vol. 142, pp. 190-200, 12// 2014.
- [48] S. V. Crowley, V. Caldeo, N. A. McCarthy, M. A. Fenelon, A. L. Kelly, and J. A. O'Mahony, "Processing and protein-fractionation characteristics of different polymeric membranes during filtration of skim milk at refrigeration temperatures," *International Dairy Journal*, vol. 48, pp. 23-30, 9// 2015.
- [49] M. Kumar and J. Lawler, "Preparation and characterization of negatively charged organic-inorganic hybrid ultrafiltration membranes for protein separation," *Separation and Purification Technology*, vol. 130, pp. 112-123, 6/10/ 2014.
- [50] S. Popović, S. Milanović, M. Iličić, M. Djurić, and M. Tekić, "Flux recovery of tubular ceramic membranes fouled with whey proteins," *Desalination*, vol. 249, pp. 293-300, 11/30/ 2009.
- [51] K. Smith, "Commercial Membrane Technology," in *Membrane Processing*, ed: Blackwell Publishing Ltd., 2013, pp. 52-72.
- [52] G. Gésan-Guiziu, "Liquid Milk Processing," in *Membrane Processing*, ed: Blackwell Publishing Ltd., 2013, pp. 128-142.
- [53] K. Posada, D. M. Terán, and J. S. Ramírez-Navas, "Empleo de lactosuero y sus componentes en la elaboración de postres y productos de confitería," *La Alimentación Latinoamericana*, vol. 292, pp. 66-75, 2011.
- [54] A. M. Pérez, "Interés de la aplicación de las tecnologías de membranas en la industria de alimentos," ed. San José de Costa Rica: Centro Nacional de Ciencia y Tecnología de Alimentos - CITA, p. 3.
- [55] B. Özer and A. Y. Tamime, "Membrane Processing of Fermented Milks," in *Membrane Processing*, ed: Blackwell Publishing Ltd., 2013, pp. 143-175.
- [56] V. V. Mistry, "Cheese," in *Membrane Processing*, ed: Blackwell Publishing Ltd., 2013, pp. 176-192.
- [57] L. Ramchandran and T. Vasiljevic, "Whey Processing," in *Membrane Processing*, ed: Blackwell Publishing Ltd., 2013, pp. 193-207.
- [58] G. Konrad and T. Kleinschmidt, "A new method for isolation of native  $\alpha$ -lactalbumin from sweet whey," *International Dairy Journal*, vol. 18, pp. 47-54, 2008.
- [59] F. Chiampo and R. Conti, "Hydrodynamics of fruit pulp ultrafiltration," *Journal of Food Engineering*, vol. 40, pp. 173-180, 1999.
- [60] A. D. Marshall, M. P.A., and T. G., "Influence of permeate flux on fouling during the microfiltration of [beta]-lactoglobulin solutions under cross-flow conditions," *Journal of Membrane Science*, vol. 130, pp. 23-30, 1997.
- [61] C. C. Ho and A. L. Zydney, "A Combined Pore Blockage and Cake Filtration Model for Protein Fouling during Microfiltration," *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 232, pp. 389-399, 2000.
- [62] C. C. Ho and A. L. Zydney, "Transmembrane pressure profiles during constant flux microfiltration of bovine serum albumin," *Journal of Membrane Science*, vol. 209, pp. 363-377, 2002.
- [63] K. Inoue, S. Nitta, T. Hino, and H. Oka, "LC-MS/MS and centrifugal ultrafiltration method for the determination of novobiocin in chicken, fish tissues, milk and human serum," *Journal of Chromatography B*, vol. 877, pp. 461-464, 2/1/ 2009.
- [64] T. Bergillos-Meca, C. Cabrera-Vique, R. Artacho, M. Moreno-Montoro, M. Navarro-Alarcón, M. Olalla, R. Giménez, I. Seiquer, and M. D. Ruiz-López, "Does *Lactobacillus plantarum* or ultrafiltration process improve Ca, Mg, Zn and P bioavailability from fermented goats' milk?," *Food Chemistry*, vol. 187, pp. 314-321, 11/15/ 2015.
- [65] S. V. Crowley, T. F. O'Callaghan, A. L. Kelly, M. A. Fenelon, and J. A. O'Mahony, "Use of ultrafiltration to prepare a novel permeate for application in the functionality testing of infant formula ingredients," *Separation and Purification Technology*, vol. 141, pp. 294-300, 2/12/ 2015.
- [66] K. Kishida, "Simplified extraction of tetracycline antibiotics from

milk using a centrifugal ultrafiltration device,” *Food Chemistry*, vol. 126, pp. 687-690, 5/15/ 2011.

- [67] N. Hengl, Y. Jin, F. Pignon, S. Baup, R. Mollard, N. Gondrexon, A. Magnin, L. Michot, and E. Paineau, “A new way to apply ultrasound in cross-flow ultrafiltration: Application to colloidal suspensions,” *Ultrasonics Sonochemistry*, vol. 21, pp. 1018-1025, 5// 2014.

**Carlos Andrés Solís-Carvajal**, es Ingeniero de Alimentos de la Universidad del Valle (Colombia).

**Carlos Antonio Vélez Pasos**, es Ingeniería Agrícola de la Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín. Master en Ingeniería Agrícola y. Doctor en Ingeniería de Alimentos de la Universidade Estadual De Campinas (Brasil). Es investigador del Grupo de Investigación Ingeniería de Procesos Agroalimentarios y Biotecnológicos (GIPAB). Actualmente es Director de la Escuela de Ingeniería de Alimentos de la Universidad del Valle (Colombia).

**Juan Sebastián Ramírez-Navas** es Ingeniero Químico de la Universidad Central del Ecuador. Doctor en Ingeniería (énfasis en Ingeniería de Alimentos) de la Universidad del Valle (Colombia). Es investigador del Grupo de Investigación Ingeniería de Procesos Agroalimentarios y Biotecnológicos (GIPAB). Actualmente es Profesor Asistente (DOMT) en la Escuela de Ingeniería de Alimentos de la Universidad del Valle (Colombia)