



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA



Evaluación del efecto de concentración del jugo de maracuyá mediante un proceso combinado de Ultrafiltración y Nanofiltración

POR

María Paz Barra Carrera

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniera Civil Química

Profesor Guía

Luis Pino Soto

Julio 2025

Concepción (Chile)

© 2025 María Paz Barra Carrera

© 2025 María Paz Barra Carrera

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

Agradecimientos

Quiero agradecer, en primer lugar, a mis padres, quienes han sido un pilar fundamental a lo largo de estos años. A mi mamá, por brindarme tranquilidad y apoyo en los momentos de estrés; su presencia constante me dio seguridad en mí misma. A mi papá, por motivarme siempre a enfrentar los desafíos e inculcarme, desde pequeña, la autonomía y la independencia. La educación, sin duda, ha sido uno de los grandes valores que ambos me transmitieron.

A mis hermanas, Javi y Cristi, por cada tarde de estudio que compartimos, acompañadas del té que siempre nos preparábamos. Gracias por la cercanía, las risas y el apoyo incondicional.

A mis amigas, a quienes conocí y forjé a lo largo de estos años en la universidad, y especialmente a mi querido grupo de proyecto, que hizo más llevadera esta última etapa apoyándonos mutuamente y compartiendo gratos momentos.

Finalmente agradecer al Profesor Luis Pino por su orientación académica y su excelente disposición en todo momento para la realización de este trabajo y también a Alexandra Rozas por su constante ayuda y paciencia en el laboratorio que fueron cruciales en cada etapa experimental.

Resumen

En la industria alimentaria, la concentración de líquidos como jugos es fundamental para reducir el volumen de transporte, aumentar la vida útil y conservar sus propiedades nutricionales. Aunque la evaporación es el método tradicional, las altas temperaturas pueden dañar compuestos sensibles como vitaminas y antioxidantes. Por ello, tecnologías no térmicas como la Ultrafiltración (UF) y la Nanofiltración (NF) se han convertido en alternativas eficientes para la concentración de jugos.

Este trabajo evaluó la concentración de jugo de maracuyá mediante un proceso secuencial de UF y NF, orientado a preservar compuestos bioactivos como polifenoles y vitamina C, así como las propiedades fisicoquímicas representadas por los grados Brix. La Ultrafiltración permitió una clarificación eficaz, disminuyendo turbidez (NTU) en el primer uso de la membrana (8,22) pero mostró baja retención de polifenoles (hasta 41%) y vitamina C (hasta 53%) y se mantuvo los grados Brix (11,5) que disminuyeron en ciclos posteriores debido al ensuciamiento progresivo de membranas. La limpieza química aplicada fue efectiva parcialmente, limitando la reutilización de la membrana en un nuevo proceso.

La Nanofiltración mostró alta eficiencia en la separación y concentración, conservando la concentración de polifenoles ($\approx 0,97$ veces) e incrementando la concentración de vitamina C ($\approx 2,5$ veces), así como un incremento en grados Brix ($\approx 1,2$ veces) cuando se aplicó directamente sobre jugo fresco. Sin embargo, su desempeño se vio condicionado con el uso del permeado de Ultrafiltración, que contenía bajo porcentaje de compuestos bioactivos y sólidos solubles.

En el proceso de Ultrafiltración, el modelo de ensuciamiento que presentó el mejor ajuste fue el de bloqueo de poros (o formación de torta). Esto provocó una reducción en la permeabilidad y en la eficiencia general del proceso, lo que evidencia la necesidad de optimizar tanto la selección y operación de membranas como los protocolos de limpieza y manejo para preservar la calidad del jugo concentrado. Por ello, futuras investigaciones deben centrarse en desarrollar y validar métodos de limpieza más eficaces, así como en implementar estrategias preventivas que minimicen el ensuciamiento, con el objetivo de prolongar la vida útil de las membranas y garantizar una operación sustentable y eficiente.

Abstract

In the food industry, the concentration of liquids such as juices is essential to reduce transport volume, increase shelf life, and preserve nutritional properties. Although evaporation is the traditional method, high temperatures can damage sensitive compounds such as vitamins and antioxidants. Therefore, non-thermal technologies such as Ultrafiltration (UF) and Nanofiltration (NF) have become efficient alternatives for juice concentration.

This study evaluated the concentration of passion fruit juice using a sequential UF and NF process aimed at preserving bioactive compounds such as polyphenols and vitamin C, as well as the physicochemical properties represented by Brix degrees. Ultrafiltration allowed for effective clarification, reducing turbidity (NTU) in the first use of the membrane (8,22), but showed low retention of polyphenols (up to 41%) and vitamin C (up to 53%) and maintained Brix degrees (11,5), which decreased in subsequent cycles due to progressive membrane fouling. The chemical cleaning applied was partially effective, limiting the reuse of the membrane in a new process.

Nanofiltration showed high efficiency in separation and concentration, preserving the concentration of polyphenols ($\approx 0,97$ times) and increasing the concentration of vitamin C ($\approx 2,5$ times), as well as an increase in Brix degrees ($\approx 1,2$ times) when applied directly to fresh juice. However, its performance was conditioned using Ultrafiltration permeate, which contained a low percentage of bioactive compounds and soluble solids.

In the ultrafiltration process, the fouling model that presented the best fit was pore blockage (or cake formation). This caused a reduction in permeability and overall process efficiency, highlighting the need to optimize both membrane selection and operation, as well as cleaning and handling protocols, to preserve the quality of the concentrated juice. Therefore, future research should focus on developing and validating more effective cleaning methods, as well as implementing preventive strategies that minimize fouling, with the aim of extending the useful life of the membranes and ensuring sustainable and efficient operation.

Índice

Agradecimientos.....	3
Resumen	4
Abstract.....	5
1.Introducción.....	8
1.1 Estado del arte	9
2.Objetivos.....	12
2.1 Objetivo general	12
2.2 Objetivos específicos.....	12
3. Metodología.....	13
3.1 Especificaciones técnicas de las membranas.....	13
3.2 Desarrollo experimental	14
3.3 Pruebas de permeabilidad.....	16
3.4 Determinación de las condiciones de operación.....	17
3.5 Procedimiento de limpieza de membranas tras cada ciclo de filtración.....	18
3.6 Análisis del ensuciamiento de membrana mediante el modelo de Hermia	18
3.7 Estudio de las resistencias	19
3.8 Estudio del ángulo de contacto.....	20
3.9 Caracterización del jugo de maracuyá antes y después de la experimentación.....	20
4.Resultados y discusión.....	24
4.1 Permeabilidad hidráulica	24
4.2 Determinación de las condiciones de operación.....	26
4.3 Modelos de filtración para la evaluación de la disminución de flujo	27
4.4 Limpieza de membranas de Ultrafiltración	29
4.5 Ultrafiltración y Nanofiltración en modo concentración.....	35
4.6 Nanofiltración en modo concentración de una pasada	38
4.7 Evaluación de parámetros de calidad del jugo concentrado.....	38
5. Conclusiones.....	46
6. Referencias	47
7. Anexos.....	49
Anexo 7.1 Tabla de permeabilidades de la membrana de Ultrafiltración	49
Anexo 7.2 Tabla de permeabilidades de la membrana de Nanofiltración.....	53
Anexo 7.3 Determinación de la densidad y viscosidad del jugo de maracuyá.....	54

Anexo 7.4 Determinación del caudal de operación.....	55
Anexo 7.5 Medición de la vitamina C.....	57
Anexo 7.6 Determinación de los polifenoles totales	59
Anexo 7.7 Equipo experimental.....	59
Anexo 7.8 Permeabilidad durante la recuperación de la membrana de Ultrafiltración	61
Anexo 7.9 Mediciones de las propiedades del jugo de maracuyá antes y después de concentrar	62
Anexo 7.10 Modo de operación de Ultrafiltración y Nanofiltración	65

1.Introducción

En la industria alimentaria se presenta la necesidad de concentrar alimentos líquidos, lo cual se logra mediante sistemas tecnológicos que permiten eliminar en gran parte el contenido de agua. Uno de los métodos más utilizados es la evaporación, que se aplica para remover el agua presente en los alimentos líquidos diluidos, obteniendo así un producto líquido concentrado. Este proceso funciona principalmente mediante la aplicación de calor al evaporador, lo que provoca que el agua se transforme en vapor y posteriormente se condense, resultando en una solución concentrada [1].

La concentración por evaporación es ampliamente utilizada en la industria de jugos de fruta, debido a que permite alcanzar concentraciones elevadas, hasta 72 °Brix, dependiendo del tipo de fruta, el pretratamiento y sus características. Generalmente, se emplean entre 4 y 6 etapas de evaporación, algunas de ellas con recompresión mecánica de vapores [1].

No obstante, cuando se busca reducir costos energéticos y condiciones extremas de procesamiento, la evaporación presenta limitaciones [2]. Estas están asociadas principalmente a pérdidas de calidad nutricional; como vitaminas y compuestos antioxidantes; y a deterioro sensorial del producto final, producto del daño térmico y la oxidación química que afectan a los compuestos más sensibles [3].

La industria de los jugos ha desarrollado diversas técnicas para conservar las características sensoriales de los jugos recién exprimidos. Entre ellas, la concentración por membrana destaca como la alternativa más prometedora frente a métodos tradicionales como la evaporación o congelación, debido a su alta eficiencia y operación a baja temperatura[4]. Este proceso permite reducir el volumen del jugo, disminuyendo así los costos de transporte, almacenamiento y envasado, además de mejorar su estabilidad microbiológica y química. A diferencia de otros métodos, la concentración por membrana preserva en gran medida la calidad organoléptica del producto, lo que la convierte en una gran opción en la industria[4].

En esta investigación, se trabajará con maracuyá, una fruta que proviene de una enredadera frutal leñosa perenne que pertenece a la familia Passifloraceae originaria de América tropical (Brasil).

Se trata de un producto de gran relevancia económica debido a su calidad y elevado rendimiento en la industria siendo apreciado a nivel mundial por su aroma y sabor [8]. Las dos principales variedades sembradas a nivel mundial de *Passiflora edulis* son el maracuyá morado (*Passiflora edulis f. edulis*) y el maracuyá amarillo (*Passiflora edulis f. flavicarpa*). Este último es la especie de maracuyá más cultivado y representa el 95 % de la producción comercial mundial de maracuyá [5].

Este fruto es una baya de forma redonda y ovalada que contiene semillas en su interior y pesa alrededor de 60 g [5]. Su sabor, similar al de la guayaba, se caracteriza por una mezcla de dulzura y acidez. Bajo su cáscara dura y lisa, se encuentra la pulpa, envuelta en una membrana gelatinosa, transparente, jugosa y con un distintivo toque agridulce [6].

El maracuyá cuenta con un mercado significativo como fruta fresca. Por ejemplo, en Brasil, que es el principal productor mundial, el 70% de la producción anual de maracuyá se comercializa como fruta fresca, lo que representa aproximadamente 158 millones de dólares al año [7]. De acuerdo con algunos investigadores, también es apto para la elaboración de jugos, néctares, concentrados, jarabes y mermeladas. Su cáscara es rica en fibra, mientras que sus semillas contienen proteína y grasa. Por esta razón también se puede ocupar como materia prima en la alimentación animal [6].

Este fruto es conocido por sus altos niveles de fibra, vitamina A, E y C ayudando a regularla digestión, reducir el colesterol, favorecer la absorción del hierro, reforzar el sistema inmunológico y actuar como antioxidante [5].

El maracuyá contiene un alto contenido nutracéutico debido a que incluye ácido fenólico; antocianinas, los principales flavonoides y β -caroteno. Estos compuestos poseen propiedades biológicas beneficiosas para la salud, como efectos protectores contra enfermedades crónicas y degenerativas, así como antivirales, antialérgicas, antiplaquetarias y antiinflamatorias [5].

1.1 Estado del arte

En los estudios previos sobre la concentración de jugos mediante membranas de Ultrafiltración (UF) y Nanofiltración (NF), estas tecnologías se han establecido como opciones eficientes y valiosas para concentrar jugos de frutas mientras se preservan sus

características sensoriales y bioactivas [8]. Estos métodos son especialmente efectivos para productos que requieren mantener su calidad nutricional sin someterlos a procesos térmicos agresivos, como los jugos de frutas tropicales.

La Ultrafiltración (UF) se ha consolidado como una estrategia tecnológica altamente eficaz para la clarificación y la concentración de jugos, al combinar la disminución de turbidez con la preservación de los componentes bioactivos. Cuando se emplean membranas con un corte de aproximadamente 5 kDa, el proceso elimina prácticamente la totalidad de los sólidos suspendidos y mejora significativamente la transparencia sin recurrir a coadyuvantes químicos. En jugo de naranja, por ejemplo, la UF ha permitido incrementar los sólidos solubles de 7,2 °Brix en el jugo fresco hasta 13,5 °Brix en el concentrado, mientras conserva más del 90 % de la vitamina C y la actividad antioxidante, valores que superan con creces los obtenidos mediante tratamientos térmicos convencionales [9]. Resultados análogos se han reportado para jugos de piña y maracuyá, donde la técnica, además de mejorar el aspecto visual, mantiene carotenoides y compuestos fenólicos responsables de la capacidad antioxidante. Por otro lado, Cassano et al [10] evidenciaron en jugo de granada que la UF clarifica el producto sin aditivos, retiene más del 80 % de los polifenoles totales y evita la degradación de las antocianinas responsables del color, otorgándole mayor estabilidad durante el almacenamiento. En conjunto, estos hallazgos ponen de manifiesto que la UF no solo mejora la apariencia en la clarificación, sino que, al preservar vitaminas, fenoles y otras moléculas de interés, mantiene el valor funcional y sensorial de los jugos, posicionándola como una alternativa competitiva frente a los métodos tradicionales de clarificación y concentración.

Por otro lado, la Nanofiltración (NF) ha demostrado una gran capacidad para concentrar compuestos bioactivos de bajo peso molecular, como flavonoides y licopeno, mientras mantiene la calidad organoléptica del jugo. En el caso del jugo de sandía, un estudio utilizando una membrana de NF con un corte molecular entre 150 y 300 Da logró concentrar nutrientes específicos sin afectar ni el color ni el sabor del jugo. Este proceso es especialmente útil en productos como el jugo de granada y tomate, donde se busca preservar la actividad antioxidante de compuestos fenólicos y carotenoides, lo que mejora

el valor nutracéutico del producto sin recurrir a procesos térmicos que puedan degradar estos componentes [11].

Durante la elaboración industrial de jugo concentrado y congelado de maracuyá, se ha reportado que las pérdidas totales de vitamina C oscilan entre el 24,5% y el 29,4% en los procesos monitoreados, incluyendo las etapas de evaporación. Estas pérdidas se deben no solo a la temperatura y tiempo de exposición durante la evaporación, sino también a otros factores como la oxidación, la calidad de la materia prima y la dilución en etapas previas al tratamiento térmico. Por lo tanto, aunque la evaporación es un método efectivo para concentrar jugos, implica una reducción significativa en el contenido de vitamina C, lo que debe considerarse para mantener la calidad nutricional del producto final [12].

Ambas tecnologías de membranas han demostrado ser alternativas valiosas frente a los métodos convencionales, como la evaporación, ofreciendo una concentración más eficiente de jugos de frutas sin comprometer la calidad nutricional y sensorial. La capacidad de operar a bajas temperaturas y presiones, junto con la preservación de compuestos bioactivos, hace que UF y NF sean tecnologías prometedoras para la industria de jugos, especialmente para aquellos productos sensibles al calor [8]. Una posible combinación de ambas tecnologías, utilizando UF para la pre-concentración y NF para la optimización de la conservación de nutrientes, podría ser una estrategia eficiente para mejorar la calidad del jugo concentrado.

2.Objetivos

2.1 Objetivo general

Evaluar la eficiencia de las tecnologías de concentración de jugo de maracuyá mediante Ultrafiltración y Nanofiltración, considerando criterios de rendimiento y calidad del producto.

2.2 Objetivos específicos

1. Analizar las propiedades fisicoquímicas y microbiológicas del jugo de maracuyá en relación con el grado de concentración alcanzado mediante Ultrafiltración y Nanofiltración.
2. Determinar el desempeño de los procesos de Ultrafiltración y Nanofiltración en la remoción de agua, considerando la eficiencia de concentración obtenida.
3. Evaluar la calidad del concentrado resultante en términos de contenido de sólidos solubles y compuestos bioactivos, en función de la tecnología aplicada.
4. Evaluar la eficacia de distintos protocolos de limpieza química y/o enzimática en la restauración de la permeabilidad hidráulica, comparando la recuperación de flujo de agua pura, la variación del ángulo de contacto y la reducción de resistencia irreversible tras cada tratamiento.

3. Metodología

3.1 Especificaciones técnicas de las membranas

Para los experimentos se utilizó dos membranas, una de Nanofiltración y la otra de Ultrafiltración.

Se utilizó una membrana comercial de Nanofiltración de la empresa Filmtec, NF90, compuesta de una delgada capa de composite (TFC). Esta membrana se caracteriza por su alto rendimiento, ya que permite alcanzar un a elevada productividad al remover eficientemente un porcentaje significativo de sales, nitratos, hierro y compuestos orgánicos presentes en el agua. La ficha técnica se muestra en la Tabla 3.1

Tabla 3.1. Especificaciones técnicas de la membrana de Nanofiltración NF90 de 200Da (Pure Aqua)

Tipo de membrana	Membrana de lámina fina de poliamida
Temperatura máxima de funcionamiento	45°C
Presión máxima de funcionamiento	41 bar
Tasa de flujo alimentación máximo	1,4 m ³ /hr
Caída de presión máxima	0,9 bar
Rechazo de sal estabilizada*	97%
Tasa de flujo permeado	2,6 m ³ /día
Rango de pH, operación continua	2-11
Rango de pH, limpieza a corto plazo (30 min)	1-13
Tolerancia al cloro libre	< 0,1 ppm

Nota: *Rechazo de sal según las siguientes condiciones de prueba: 2000 ppm deMgSO₄, 25 °C y 15% de recuperación a la presión especificada anteriormente.

Se empleó una membrana comercial de Ultrafiltración de la empresa Synder Filtration, modelo LY PES 100 kDa, configurada en elemento en espiral (spiral-wound) y constituida por una delgada capa activa de polietersulfona (PES). Esta membrana se distingue por su alto rendimiento, ya que permite alcanzar una elevada productividad al retener eficientemente proteínas, polisacáridos y otros compuestos de alto peso molecular presentes en las corrientes de proceso. Asimismo, su excelente resistencia química, térmica y al ensuciamiento la hace especialmente adecuada para aplicaciones de clarificación y concentración en la industria alimentaria. La ficha técnica se muestra en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2. Especificaciones técnicas de la membrana de Ultrafiltración LY PES 100 kDa (Synder Filtration)

Tipo de membrana	PES (Polietersulfona)
Temperatura máxima de operación	55 °C
Presión máxima de operación	8,3 bar
Flujo cruzado recomendado (modelo 2540)	2,0–3,0 m ³ /h
Caída de presión máxima	1,2 bar
Rango de pH en operación (25 °C)	2–10
Rango de pH en limpieza (50 °C)	1,8–11
Tolerancia al cloro libre en operación	< 0,1 ppm

Preparación previa de las membranas para filtración

Se recortan segmentos específicos de la membrana enrollada en forma de espiral. Se lleva enseguida a un baño sumergido con agua destilada para conservarla. Luego para abrir los poros de la membrana, eliminar impurezas y que se rehidrate se sumergen en una solución de etanol al 30% v/v por al menos 2 horas. Finalmente se vuelve a conservar en agua destilada para su posterior uso.

3.2 Desarrollo experimental

Para concentrar el jugo de maracuyá mediante procesos de membrana se emplearon dos membranas de Ultrafiltración (UF) con corte de 100 kDa y cuatro de Nanofiltración (NF) con corte de 200 Da. En la UF se realizaron dos corridas por cada membrana para evaluar la reproducibilidad del sistema; las membranas se codificaron como UF-1 y UF-2.

En Nanofiltración se evaluaron cuatro membranas de 200 Da, designadas como NF-1, NF-2, NF-3 y NF-4; la NF-1 se empleó únicamente para determinar la presión óptima de operación, mientras que las NF-2, NF-3 y NF-4 se utilizaron en los experimentos de concentración.

Se muestra en la Tabla 3.3 la codificación del proceso

Tabla 3.3. Codificación y características de los ensayos de Ultrafiltración (UF) y Nanofiltración (NF)

Código	Membrana	Objetivo
AA	UF-1 (100 kDa)	Primer ensayo con UF-1 para establecer la línea base y evaluar reproducibilidad.
AB	UF-1 (100 kDa)	Repetición de AA para confirmar la reproducibilidad del sistema con la misma membrana.
BA	UF-2 (100 kDa)	Primer ensayo con UF-2; permite contrastar el desempeño de UF-2 frente a UF-1.
BB	UF-2 (100 kDa)	Repetición de BA para verificar reproducibilidad con UF-2.
CC	NF-2 (200 Da)	Ensayo de concentración en secuencia UF → NF; NF-2 con alimentación preclarificada.
DD	NF-3 (200 Da)	Condiciones idénticas a CC; se compara la selectividad de NF-3 en el mismo esquema de dos etapas.
EE	NF-4 (200 Da)	Proceso de una sola etapa (solo NF); sirve como referencia frente a los ensayos en dos etapas CC y DD.

La solución de alimentación está previamente centrifugada para así trabajar con lo menos posible de sólidos suspendidos. Se centrifuga durante 10 minutos a 5000 rpm. Se parte con el proceso de Ultrafiltración para luego así ocupar el permeado para la Nanofiltración.

Esto se detalla en la Figura 3.1:

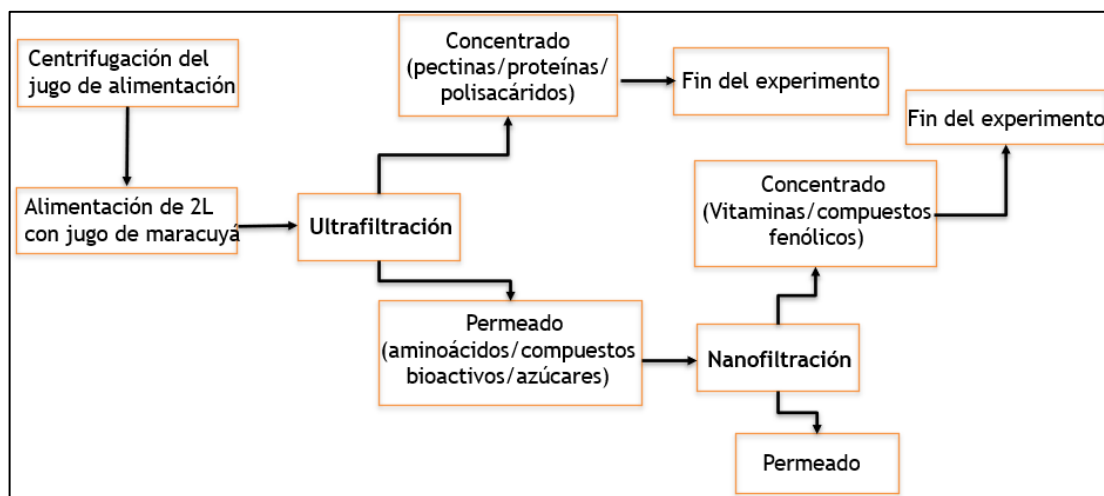


Figura 3.1. Diagrama de flujo del proceso experimental de concentración del jugo de maracuyá mediante Ultrafiltración y Nanofiltración

3.3 Pruebas de permeabilidad

Para la Ultra y Nanofiltración se utiliza una unidad piloto de laboratorio de sistema de filtración tangencial (CF tipo SEPA, marca Sterlitech, USA) equipada con una membrana de flujo cruzado cuya área activa es de $0,014 \text{ m}^2$ [13]. Se midió la permeabilidad determinando la masa de agua obtenida cada 3 minutos. En el caso de la Ultrafiltración se ocupan presiones de 3, 4 y 5 bar y para la Nanofiltración presiones de 20, 30 y 35 bar.

El flujo de permeado de agua destilada J_w se calcula con la siguiente fórmula:

$$J_w = \frac{\Delta V}{A \Delta t} \frac{\eta_{T^\circ\text{C}}}{\eta_{20^\circ\text{C}}} \quad (1)$$

Donde J_w corresponde al flujo de permeado de agua destilada recolectada ($\frac{L}{\text{m}^2\text{h}}$), ΔV corresponde al volumen de permeado recolectado (L), A corresponde al área activa de la membrana (m^2), Δt el tiempo transcurrido en horas, $\eta_{T^\circ\text{C}}$ y $\eta_{20^\circ\text{C}}$ corresponden a la viscosidad del agua [Pa s] a una determinada temperatura en $^\circ\text{C}$ y a 20°C respectivamente.

El equipo consta de una probeta de 2 L para medir la razón de volumen concentrado, una bomba de presión de alimentación de desplazamiento positivo, dos manómetros ubicados en la entrada y salida del módulo de la membrana, un rotámetro para medir el caudal de alimentación y un intercambiador de calor para mantener constante la temperatura de la solución aproximadamente de 20°C . Se utilizó una balanza digital conectada al sistema para medir los flujos de permeado cada cierto tiempo. En cada medición se midió la conductividad de la solución.

La Figura 3.2 representa el equipo de filtración utilizado en este estudio, integrado por una probeta de alimentación de 2 L (1) conectada a una bomba de desplazamiento positivo (2) que impulsa el jugo hacia el módulo de membrana (4). La presión de operación se monitorea mediante los manómetros de entrada y salida (3 y 7) y se ajusta con una válvula de regulación (8), mientras que el caudal se controla con un rotámetro (9). El permeado se recolecta en un vaso de precipitado colocado sobre una balanza (5-6) para el registro continuo de masa, y un intercambiador de calor (10) mantiene constante la temperatura durante las pruebas. Este montaje experimental permite medir con precisión el volumen de concentrado y evaluar el desempeño de los procesos de Ultra y Nanofiltración.

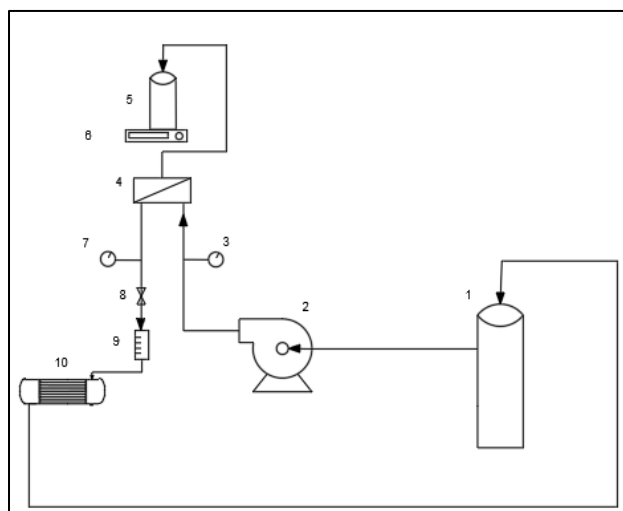


Figura 3.2. Planta piloto de laboratorio de Ultra y Nanofiltración

3.4 Determinación de las condiciones de operación

Determinación presión de operación:

Para poder determinar la presión de operación óptima se siguió el procedimiento de un estudio previo [14]. Se realizó un ensayo experimental utilizando un sistema en modo de recirculación total, es decir, el concentrado y permeado retornan al estanque de alimentación el cual permitió mantener constante la composición de la solución de alimentación durante la prueba.

La operación se mantuvo a una temperatura constante de 20°C con un caudal de alimentación fijo de 100 L/h. El ensayo consistió en variar la presión transmembrana (ΔP) en incrementos progresivos. Para el caso de la Ultrafiltración se utilizaron las presiones 2, 3, 4 y 5 bar y para el caso de la Nanofiltración las presiones de 20, 25, 30 y 35 bar. En cada etapa se midió el flujo de permeado en condiciones estables. Este flujo se calculó a partir de la masa de permeado obtenido en un tiempo definido de 3 minutos y la densidad del jugo obtenida previamente. También se consideró el área efectiva de membrana disponible para la filtración. Con los valores de flujo obtenidos a distintas presiones fue posible graficar la relación entre el flujo permeado y presión transmembrana. Esta gráfica permitió identificar la zona en la que el incremento de presión generó un aumento lineal del flujo, así como el punto a partir del cual dicho incremento se volvía menos significativo, lo que indica la aparición de fenómenos como la polarización por concentración o el ensuciamiento de la membrana.

El análisis de los resultados permitió establecer que la presión de operación óptima es aquella que mantiene un flujo permeado elevado sin pérdida de pendiente, al tiempo que minimiza la polarización por concentración y prolonga el periodo de inducción previo al inicio del ensuciamiento de la membrana.

Determinación caudal de operación:

Para establecer el caudal de operación, se tomó como referencia el caudal máximo utilizado en un estudio previo de destilación osmótica [15]. A partir de este valor, se calculó la velocidad de flujo correspondiente, lo que permitió determinar el número de Reynolds asociado. Este valor fue luego comparado con los números de Reynolds obtenidos para distintos caudales del equipo, en el rango de 100 a 400 L/h. Finalmente, se seleccionó el caudal cuya condición hidrodinámica generara un número de Reynolds lo más cercano posible al valor de referencia, con el fin de establecer una comparación representativa entre ambos procesos. Los cálculos más detallados se ven en el Anexo 7.4.

3.5 Procedimiento de limpieza de membranas tras cada ciclo de filtración

Después de cada uso de membrana se hizo en primer lugar recircular agua para limpiar superficialmente la membrana a una temperatura de 25 °C. Seguido esto se hizo un lavado básico debido a que la membrana solo contiene residuos orgánicos del jugo de maracuyá. El lavado básico consistió en una solución de NaOH al 0.1% y EDTA al 1%. Se dejó actuar la solución por 15 minutos a un flujo de 300 L/h, luego reposar durante 10 minutos y nuevamente circular por 15 minutos.

Después del lavado químico se sumergió la membrana en etanol al 30% por un par de horas y luego se recirculó agua a 25 °C durante media hora para eliminar etanol u otro residuo presente en la membrana.

3.6 Análisis del ensuciamiento de membrana mediante el modelo de Hermia

El fenómeno de ensuciamiento representa un factor determinante en el comportamiento de los procesos de filtración por membrana. Su presencia se manifiesta principalmente a través de la disminución progresiva del flujo de permeado con el transcurso del tiempo de operación, lo cual puede atribuirse a múltiples mecanismos como la formación de capas de torta sobre la superficie de la membrana, la adsorción de compuestos en su estructura y el

eventual bloqueo de poros. Para estudiar estos mecanismos y su impacto, se aplicó el modelo de Hermia, ampliamente utilizado en la literatura científica [16].

Dado que el proceso de filtración suele presentar diferentes etapas, con comportamientos distintos según la región de operación, se recurrió al ajuste de los datos experimentales a las ecuaciones propuestas en dicho modelo, las cuales permiten describir diversas formas de disminución del flujo. Estas ecuaciones, que corresponden a distintos mecanismos de ensuciamiento, se detallaron en la Tabla 3.4. Al aplicar las ecuaciones a los datos experimentales, se consideró la relación lineal entre transformaciones del flujo de permeado y el tiempo. De este modo, la pendiente de cada curva obtenida permitió calcular el coeficiente de transferencia de masa asociado a cada modelo, mientras que el flujo inicial (J_0) y el coeficiente de regresión (R^2) se determinaron a partir del ajuste estadístico de dichas ecuaciones.

Tabla 3.4. Modelos matemáticos de Hermia para el análisis del ensuciamiento de membranas

Modelo	Ecuación	Nombre corto
Filtración de bloqueo completo	$\ln(J) = \ln(J_0) - 1 + k_A \cdot t$	A
Filtración de bloqueo estándar	$J^{-1/2} = J_0^{-1/2} + k_B \cdot t$	B
Filtración de bloqueo intermedio	$J^{-1} = J_0^{-1} + k_C \cdot t$	C
Filtración de torta	$J^{-2} = J_0^{-2} + k_D \cdot t$	D

3.7 Estudio de las resistencias

El estudio de las resistencias que afectan el flujo a través de la membrana se llevó a cabo considerando tanto los fenómenos reversibles como los irreversibles que contribuyen a la pérdida de rendimiento. Para ello, se empleó un enfoque basado en un modelo de resistencias en serie, donde la resistencia total al paso del flujo, R_T , se expresa como la suma de varias componentes [17] :

$$R_T = R_m + R_c + R_{f,rev} + R_{f,irr} \quad (2)$$

Donde R_m es la resistencia intrínseca de la membrana; R_c , la originada por la formación de torta (acumulación de solutos en la superficie); $R_{f,rev}$, la asociada al ensuciamiento

reversible que puede eliminarse con limpieza química; y $R_{f,irr}$, la correspondiente al ensuciamiento irreversible, que no se remueve con la limpieza estándar.

La resistencia intrínseca de la membrana, R_m , se estima a partir de la permeabilidad hidráulica de una membrana nueva y previamente hidratada con etanol, usando la ecuación:

$$R_m = \frac{1}{\eta_{20^\circ\text{C}} L_p^0} \quad (3)$$

Donde $\eta_{20^\circ\text{C}}$ es la viscosidad del agua a 20°C (kPa s), y L_p^0 es la permeabilidad hidráulica utilizando agua destilada ($m s^{-1} kPa^{-1}$).

Los métodos de limpieza permiten evaluar R_c y $R_{f,re}$. El modelo de resistencias después del lavado con agua queda de la siguiente manera:

$$R_m + R_{f,re} + R_{f,irr} = \frac{1}{\eta_{20^\circ\text{C}} L_p^1} \quad (4)$$

Donde L_p^1 es la permeabilidad hidráulica después de la limpieza con agua.

Se puede eliminar $R_{f,re}$ con la limpieza química y la ecuación se reduce de la siguiente forma:

$$R_m + R_{f,irr} = \frac{1}{\eta_{20^\circ\text{C}} L_p^2} \quad (5)$$

Donde L_p^2 es la permeabilidad hidráulica después de la limpieza con base.

3.8 Estudio del ángulo de contacto

Se midió el ángulo de contacto de la membrana utilizando el medidor de ángulo de contacto Krüss DSA25. Esta medición permitió evaluar la hidrofobicidad o hidrofília superficial mediante la formación y análisis de gotas de agua sobre la membrana, obteniendo valores que reflejan las propiedades de la superficie tras los diferentes tratamientos aplicados.

3.9 Caracterización del jugo de maracuyá antes y después de la experimentación

A continuación, se detalla una serie de procedimientos para caracterizar el jugo de maracuyá.

Medición de la conductividad:

La conductividad del jugo de maracuyá es medida antes y después del proceso de concentración con el objetivo de evaluar los cambios en el contenido de sólidos iónicos disueltos. Esta medición permitió estimar la variación en la concentración de sales y otros compuestos cargados eléctricamente presentes en el jugo, y fue un indicador complementario para caracterizar el efecto del tratamiento por membranas sobre la composición del producto.

Medición del pH:

El pH del jugo de maracuyá fue medido tanto antes como después del proceso de concentración con el fin de monitorear posibles variaciones en la acidez del producto. Esta medición es fundamental, ya que el pH influye directamente en la estabilidad microbiológica, el sabor y la calidad general del jugo. Durante procesos como la Ultrafiltración y Nanofiltración, pueden producirse cambios en la composición química del jugo que afecten su acidez, por lo que registrar este parámetro permitió evaluar el impacto del tratamiento aplicado. Además, un control adecuado del pH es crucial para prevenir el crecimiento de microorganismos y preservar las propiedades sensoriales del concentrado final [18].

Determinación de la turbidez

La turbidez de las muestras se determinó utilizando un turbidímetro modelo TU-2016 de la marca Lutron. Este equipo permitió medir el grado de dispersión de la luz causado por partículas en suspensión en un líquido, expresando el resultado en unidades de turbidez nefelométricas (NTU). La medición de turbidez fue especialmente relevante para evaluar la claridad del jugo de maracuyá antes y después del proceso de filtración, permitiendo cuantificar la eficiencia del tratamiento aplicado. El equipo cuenta con funciones de calibración, ajuste a cero y registro, lo que asegura lecturas precisas y repetibles bajo condiciones controladas.

Determinación de los grados Brix:

En este caso se ocupó un refractómetro para la medición. Se colocó una gota del jugo antes y después de concentrarlo y se observó el valor de °Brix correspondiente. Este valor indicó la concentración de sólidos solubles, principalmente azúcares, en la solución.

Determinación de polifenoles:

La cuantificación de polifenoles totales en las muestras se realizó mediante el método colorimétrico de Folin-Ciocalteu, utilizando ácido gálico como estándar de referencia. La preparación de los reactivos incluyó la disolución de 0,05 g de ácido gálico en 500 mL de agua destilada para obtener una solución madre de 0,1 mg/mL. Paralelamente, se preparó una solución al 20% de carbonato de sodio, disolviendo 10 g en 50 mL de agua Milli-Q.

Para la curva de calibración, se realizaron diluciones seriadas del ácido gálico con metanol al 80%, generando 10 niveles de concentración. En tubos Eppendorf de 2 mL se extraen 180 μ L de cada dilución, junto con 360 μ L de agua destilada y 90 μ L del reactivo Folin-Ciocalteu. Los tubos se agitaron por 15 segundos y se incubó durante 5 minutos en oscuridad. Posteriormente, se añadió 450 μ L de carbonato de sodio al 20%, se agitó nuevamente por 15 segundos y se incubó durante 30 minutos en oscuridad. Las muestras se centrifugaron a 10.000 rpm durante 5 minutos y se midió la absorbancia del sobrenadante a 750 nm.

Para la medición del extracto, se siguió el mismo procedimiento, reemplazando las diluciones estándar por 180 μ L del extracto (diluido si fue necesario). La concentración de polifenoles totales se expresó como equivalentes de ácido gálico (mg EAG/mL), calculada a partir de la ecuación obtenida en la curva de calibración.

Determinación de la vitamina C:

La cuantificación del contenido de vitamina C (ácido ascórbico) se realizó utilizando la técnica de espectrofotometría en el ultravioleta (UV), fundamentada en la construcción de una curva de calibración a partir de soluciones estándar preparadas con ácido ascórbico puro por el método de Ramírez E. [19].

Para la preparación de la curva estándar, se disolvió 0,1 gramos de ácido ascórbico en 100 ml de agua destilada para obtener una solución madre con concentración conocida. A partir de esta solución inicial, se realizaron diluciones seriadas con agua destilada para obtener diferentes concentraciones dentro del rango esperado en las muestras.

Las muestras de jugo fueron diluidas en proporción 1/100 y que permitieron que el contenido de ácido ascórbico estuviera dentro del rango lineal de la curva patrón.

Las mediciones espectrofotométricas se llevaron a cabo utilizando un espectrofotómetro UV con cubetas de cuarzo de 1 cm de camino óptico. La absorbancia de las soluciones estándar y de las muestras se midió a 264 nm, correspondiente a la longitud de onda máxima de absorción del ácido ascórbico en agua.

La construcción de la curva de calibración consistió en graficar la absorbancia en función de la concentración de las soluciones estándar, y se ajustó una regresión lineal para obtener la ecuación que relaciona ambas variables. Esta ecuación permitió la determinación cuantitativa del ácido ascórbico en las muestras por interpolación.

Se verificó la linealidad del método a través del coeficiente de correlación (r), el cual es cercano a 1, lo que confirmó la proporcionalidad entre absorbancia y concentración dentro del intervalo analizado.

4.Resultados y discusión

4.1 Permeabilidad hidráulica

Las capacidades hidráulicas de las dos membranas de Ultrafiltración (100 kDa) se evaluaron con agua destilada, midiendo el flujo en función de la presión. De las Figuras 4.1 y 4.2 se obtuvieron permeabilidades de 25,22 y 19,22 L m⁻² bar⁻¹ h⁻¹ para las membranas UF-1 y UF-2, respectivamente; no obstante, esta diferencia resulta estadísticamente no significativa en el rango de presión ensayado, por lo que ambas pueden considerarse hidráulicamente equivalentes. En ambos casos se comprobó un comportamiento lineal flujo-presión típico de membranas limpias, sin compresión ni fouling apreciables, lo que confirma que, bajo las mismas condiciones operativas, las dos membranas presentan características de transporte de agua muy similares.

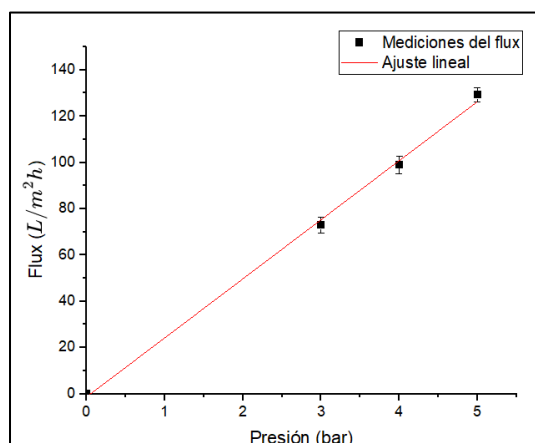


Figura 4.1. Flux en función de la presión para membrana 1 de Ultrafiltración

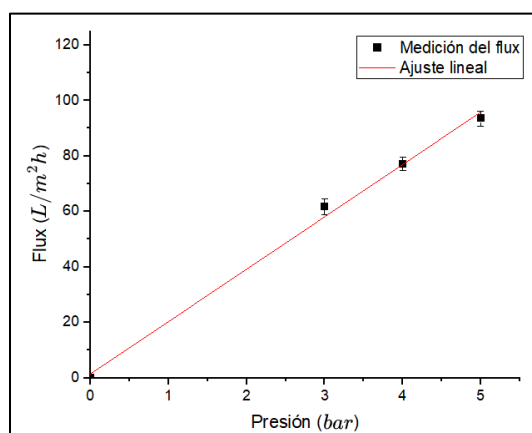


Figura 4.2. Flux en función de la presión para membrana 2 de Ultrafiltración

Para el caso de la Nanofiltración se ocuparon 4 membranas a lo largo de la investigación. A partir de la siguiente figura se obtuvieron permeabilidades similares cuyos valores fueron de 2,95 L/m²·bar·h (Figura 4.3-1); 2,61 L/m²·bar·h (Figura 4.3-2); 2,75 L/m²·bar·h (Figura 4.3-3) y 3,19 L/m²·bar·h. (Figura 4.3-4). Estos valores fueron menores a las permeabilidades que se reportaron en la literatura [14] donde determinaron permeabilidades de la membrana de Nanofiltración de alrededor de 5 L/m²·bar·h.

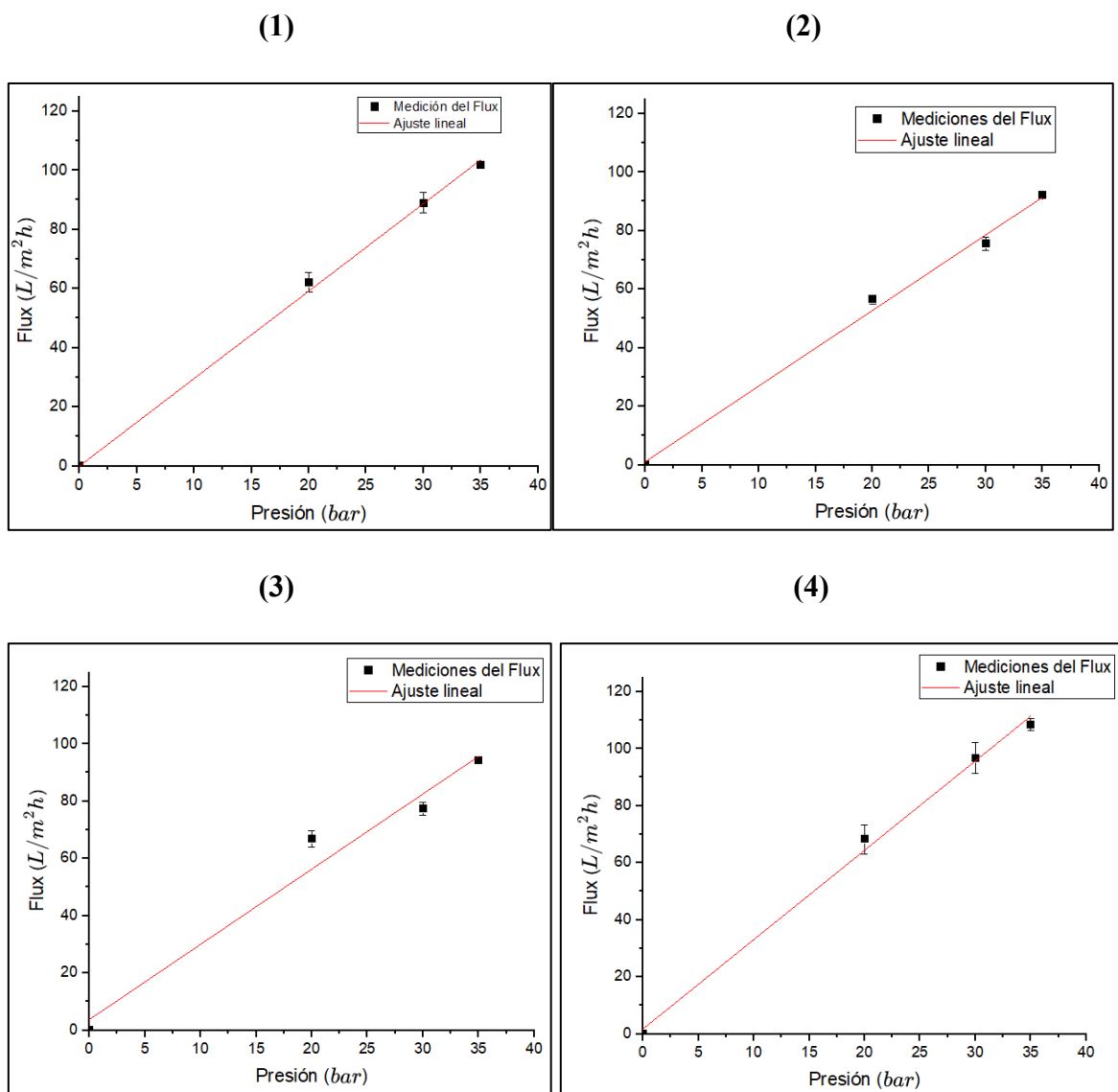


Figura 4.3. Relación entre el flujo permeado y la presión transmembrana para las cuatro membranas de Nanofiltración evaluadas (1, 2, 3 y 4).

4.2 Determinación de las condiciones de operación

De acuerdo al Anexo 4 se determinó que el caudal de operación cuyo Reynolds se asemejaba al estudiado en la publicación de Mafra et al. [15] era de 100 L/h por lo cual se trabajó a un caudal máximo de 100 L/h para concentrar con Ultra y Nanofiltración.

La Figura 4.4 muestra la densidad de flujo de permeado en función del incremento de la presión de operación para agua destilada y para jugo de maracuyá, evidenciando una diferencia importante. En el caso del agua se aprecia una relación estrictamente lineal en todo el intervalo estudiado, reflejo de un régimen gobernado casi en exclusiva por la resistencia intrínseca de la membrana, sin señales de fouling ni de polarización por concentración. Por el contrario, el jugo de maracuyá registra valores de flujo de permeado sensiblemente menores y muestra una ligera desviación de la linealidad a partir de 3 bar, fenómeno atribuible a la formación de una capa de concentración y a la acumulación de sólidos sobre la superficie de la membrana. La comparación de ambos perfiles revela, por tanto, que 3 bar constituye la presión de operación óptima: por encima de este valor el incremento adicional de ΔP apenas mejora el flujo debido a las limitaciones impuestas por el ensuciamiento.

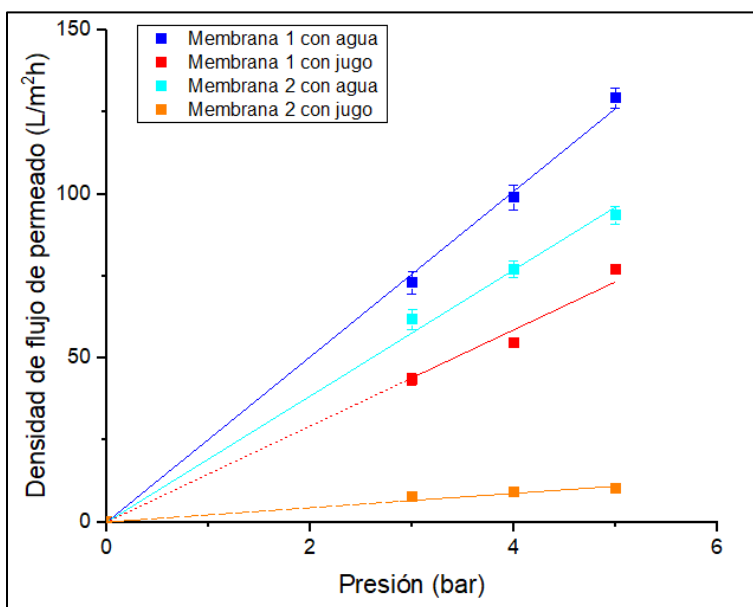


Figura 4.4. Efecto de la presión transmembrana en el flux de permeado para la membrana 1 y 2 de Ultrafiltración

Para el caso de la membrana de Nanofiltración se obtiene el siguiente gráfico:

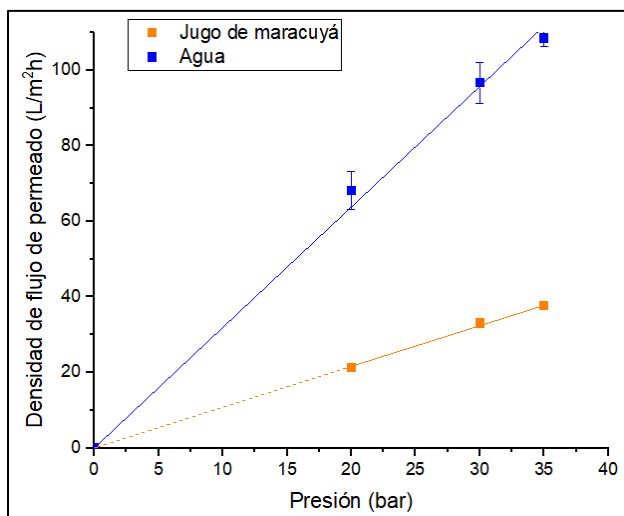


Figura 4.5. Efecto de la presión transmembrana en el flux de permeado para la membrana 1 de Nanofiltración

Al igual que en la curva de Ultrafiltración, el flujo de permeado del jugo de maracuyá aumenta linealmente con la presión solo en el tramo inicial; a partir de 25 bar cambia esa tendencia lineal y se alcanza un flujo límite, porque las partículas comienzan a depositarse sobre la superficie de la membrana y la capa formada se espesa con cada incremento adicional de la presión, sin que ello genere un incremento proporcional de caudal. Cuando la presión se reduce, el flujo no vuelve a los valores originales, lo que evidencia un comportamiento de histéresis: la torta se ha consolidado y las fuerzas de corte ya no logran desprenderla. Este fenómeno, muy similar al descrito en investigaciones para la Nanofiltración de jugo de kiwi, donde se confirma que por presiones sobre los 30 bar la operación resulta ineficiente, acelera el ensuciamiento y empeora la calidad del permeado; de ahí que dicho valor se proponga como la presión óptima de trabajo en nuestro sistema de Nanofiltración [17].

4.3 Modelos de filtración para la evaluación de la disminución de flujo

La Figura 4.6 muestra el ajuste de los diferentes modelos al comportamiento experimental de disminución de flujo durante la Ultrafiltración de jugo de maracuyá, evidenciando diferencias claras en la capacidad predictiva de cada uno. El modelo de formación de torta (D) presentó el mejor ajuste, lo que indica que el principal mecanismo de disminución de

flujo corresponde a la acumulación progresiva de sólidos sobre la superficie de la membrana, formando una capa densa que aumenta significativamente la resistencia al paso del solvente.

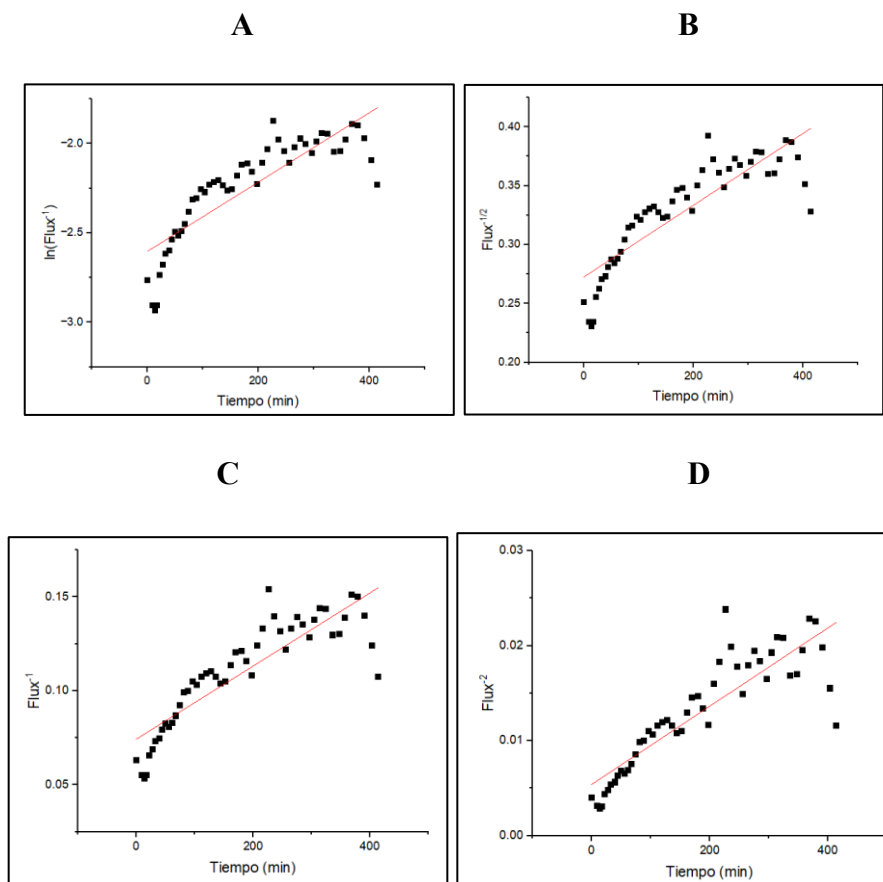


Figura 4.6. Ajuste de los modelos matemáticos de Hermia (A: bloqueo completo, B: bloqueo intermedio, C: bloqueo estándar, D: formación de torta) al comportamiento del flujo durante el proceso de Ultrafiltración de jugo de maracuyá.

Se obtuvo de los gráficos los siguientes parámetros:

Tabla 4.1. Parámetros obtenidos del ajuste de los modelos de Hermia al proceso de Ultrafiltración de jugo de maracuyá.

Modelo	J_0 ($L m^{-2} h^{-1}$)	R^2	k
A	13,51	0,71	$0,00194 s^{-1}$
B	13,46	0,74	$3,04E-4 m^{-\frac{1}{2}} s^{-1}$
C	13,46	0,75	$1,94E-4 m^{-1} s^{-1}$
D	13,63	0,76	$4,12E-5 m^{-2} s^{-1}$

Los resultados obtenidos mostraron que el modelo de formación de torta (modelo D) presentó los mayores coeficientes de determinación (R^2), lo que indicó que este mecanismo fue el principal responsable de la pérdida de flujo durante el proceso de UF. Este comportamiento es consistente con lo reportado en la literatura para jugos de frutas con alto contenido de compuestos coloidales y viscosos, como es el caso del jugo de maracuyá [20]. La formación de torta se produce cuando los solutos son más grandes que los poros de la membrana y se depositan progresivamente en su superficie, generando una capa que actúa como barrera adicional a la permeación.

Durante la clarificación del jugo de maracuyá mediante procesos de microfiltración, Castro et al. [21] identificaron que el mecanismo predominante de fouling es la formación de una torta superficial sobre la membrana. Este modelo se caracterizó por la acumulación progresiva de partículas coloidales y compuestos orgánicos, como pectinas y polisacáridos, que forman una capa compacta y densa en la superficie de la membrana. Esta capa actúa como una barrera adicional al paso del permeado, lo que causó una disminución significativa en el flujo y aumentando la resistencia hidráulica del sistema. La naturaleza reversible de este fouling por torta permite que, mediante limpiezas físicas o químicas adecuadas, se pueda recuperar parcialmente el rendimiento de la membrana. Además, Castro et al. resaltan que pretratamientos como la hidrólisis enzimática y la centrifugación contribuyen a reducir la carga de sólidos suspendidos y la viscosidad del jugo, lo que ayuda a minimizar la formación de esta torta y mejora la estabilidad del flujo durante la operación [21].

4.4 Limpieza de membranas de Ultrafiltración

La Figura 4.7 muestra el efecto del ensuciamiento y la eficiencia de distintos métodos de limpieza sobre el flujo de permeado en la membrana de Ultrafiltración utilizada con jugo de maracuyá, evaluada en dos momentos del proceso: (A) después del ensayo para determinar la presión óptima y (B) tras un ciclo completo de concentración

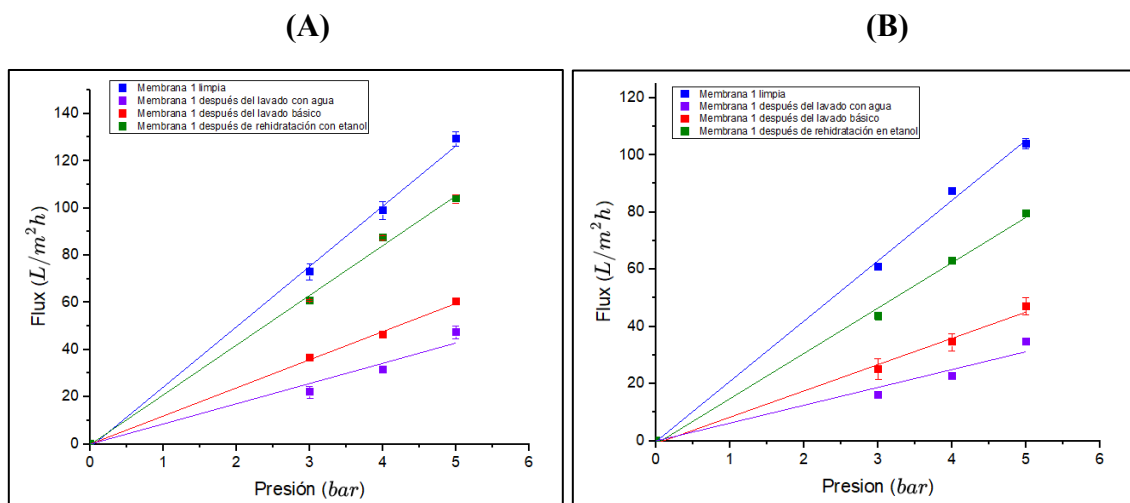


Figura 4.7. Efecto del ensuciamiento y de los métodos de limpieza sobre el flujo de permeado en la membrana 1 de Ultrafiltración (100 kDa), evaluada en dos momentos del proceso: (A) primer uso de la membrana (determinación de presión óptima) y (B) tras un ciclo completo de concentración de jugo de maracuyá.

En la primera etapa, posterior al uso inicial de la membrana con jugo de maracuyá para determinar la presión óptima, se observó una disminución significativa del flujo en comparación con el estado limpio, esto refuerza lo obtenido mediante los modelos de Hermia obtenidos anteriormente, evidenciando la presencia predominante de fouling superficial por la formación de la torta. Esta pérdida se cuantificó mediante el cálculo de la permeabilidad hidráulica, obtenida a partir de un ajuste lineal de los datos de flujo frente a presión.

La membrana en condición limpia presentó una permeabilidad hidráulica de $25,22 \text{ L m}^{-2} \text{ bar}^{-1} \text{ h}^{-1}$. Después del enjuague con agua la permeabilidad disminuyó a $8,56 \text{ L m}^{-2} \text{ bar}^{-1} \text{ h}^{-1}$, lo que corresponde a una recuperación del 33,9 % respecto al valor inicial. El ensuciamiento de membranas se clasifica en fracción reversible e irreversible, y la pérdida observada se atribuye mayoritariamente al componente reversible, dado que la limpieza básica con detergente incrementó la permeabilidad a $11,92 \text{ L m}^{-2} \text{ bar}^{-1} \text{ h}^{-1}$, equivalente a un 47,3 % de recuperación. El remanente corresponde al ensuciamiento irreversible, el cual solo se redujo parcialmente tras el tratamiento con etanol, elevando la permeabilidad a $21,03 \text{ L m}^{-2} \text{ bar}^{-1} \text{ h}^{-1}$ y alcanzando así una recuperación global del 83,4 % en comparación con la membrana limpia.

En la segunda etapa, luego de someter la membrana a un ciclo completo de concentración, se observó una caída aún mayor en la permeabilidad, atribuida al mayor contenido de sólidos, la prolongada exposición al jugo y el aumento de la concentración, lo cual intensificó el ensuciamiento. En esta instancia, la permeabilidad de la membrana limpia se estableció en 21,03 L/m²·bar·h, mientras que tras el lavado con agua fue de solo 6,24 L/m²·bar·h, equivalente a una recuperación del 29,7 %. El lavado básico incrementó este valor a 8,97 L/m²·bar·h (42,7 % de recuperación), y el reposo en etanol permite alcanzar 15,59 L/m²·bar·h, lo que representó un 74,1 % de recuperación.

Estos resultados reflejan la complejidad del fouling orgánico en membranas durante la Ultrafiltración de jugo de maracuyá, causado principalmente por la acumulación de compuestos como pectinas, proteínas, azúcares y polifenoles, que forman una capa densa sobre la superficie, disminuyendo el flujo de permeado y afectando la selectividad [22]. Este tipo de fouling es característico en la clarificación de jugos de frutas tropicales y representa un desafío para la recuperación total del rendimiento de las membranas.

La limpieza con soluciones alcalinas mostró una mejora en la recuperación del flujo, debido a la capacidad de estas soluciones para solubilizar y remover compuestos orgánicos predominantes en el jugo, como pectinas y proteínas. Sin embargo, la presencia de compuestos menos polares y fuertemente adheridos, como ciertos polifenoles, limitó la eficacia de este método, ya que estos forman enlaces resistentes con la superficie de la membrana [23].

Por otro lado, el uso de etanol como agente de limpieza resultó más efectivo para desestabilizar y solubilizar compuestos orgánicos hidrofóbicos y lipídicos, alterando temporalmente la estructura de la membrana y facilitando la remoción del fouling persistente. No obstante, algunos componentes del jugo, como las pectinas de alto peso molecular y polifenoles, forman capas compactas que dificultan la recuperación completa del rendimiento original de la membrana tras el tratamiento con etanol [23].

En consecuencia, el fouling orgánico en membranas usadas para el jugo de maracuyá es complejo y multifactorial, por lo que se recomienda implementar protocolos de limpieza combinados y adaptados para maximizar la recuperación funcional y prolongar la vida útil del sistema.

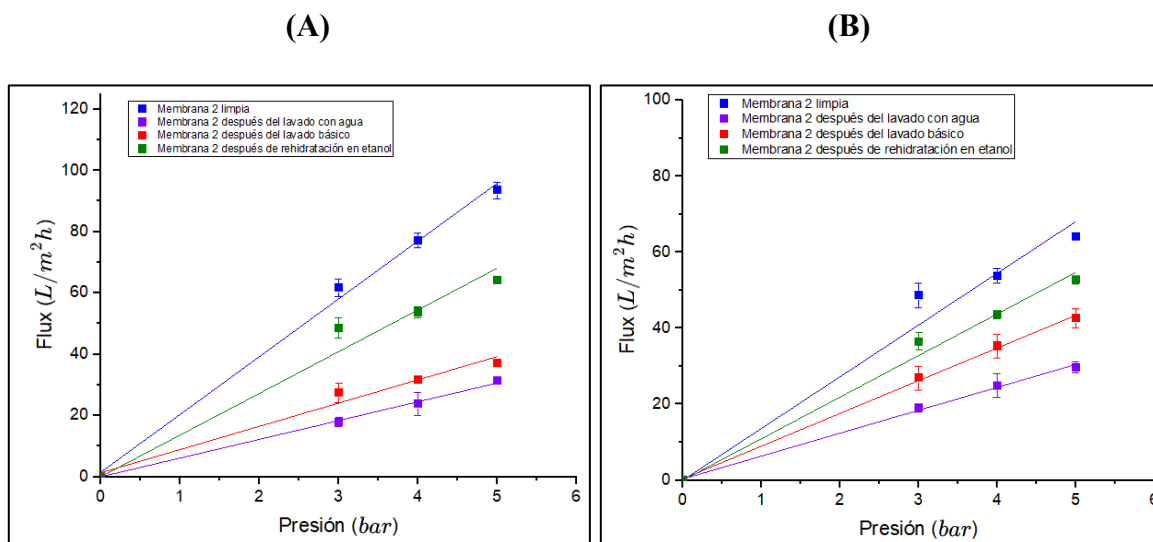


Figura 4.8. Efecto del ensuciamiento y de los métodos de limpieza sobre el flujo de permeado en la membrana 2 de Ultrafiltración (100 kDa), evaluada en dos momentos del proceso: (A) primer uso de la membrana (determinación de presión óptima) y (B) tras un ciclo completo de concentración de jugo de maracuyá.

En el caso de la membrana 2, el comportamiento observado fue similar al de la membrana 1. Se evidenció una disminución del flujo tras el uso con jugo de maracuyá y una recuperación parcial mediante los distintos métodos de limpieza. Al igual que en la membrana anterior, el lavado con agua fue el menos efectivo, mientras que el tratamiento con etanol mostró la mayor eficiencia en la restauración del flujo. Estos resultados refuerzan la tendencia general de que el ensuciamiento afecta significativamente la permeabilidad, y que el fouling orgánico puede ser revertido en mayor medida con tratamientos que disuelvan compuestos hidrofóbicos acumulados en la superficie de la membrana.

Estudio de las resistencias

A continuación, se muestra la Tabla 4.2, que resume los resultados del modelo de resistencias en serie aplicado a la Ultrafiltración del jugo de maracuyá.

Tabla 4.2. Valores de resistencias hidráulicas obtenidas durante la Ultrafiltración de jugo de maracuyá para ambas membranas y diferentes ciclos de uso.

	R_T $\times 10^{14}$ (m^{-1})	R_m $\times 10^{14}$ (m^{-1})	R_c $\times 10^{14}$ (m^{-1})	$R_{f, re}$ $\times 10^{14}$ (m^{-1})	$R_{f, irr}$ $\times 10^{14}$ (m^{-1})	$R_m(\%)$	$R_c(\%)$	$R_f(\%)$
Membrana 1 después del primer uso	1,0	0,14	0,41	0,30	0,17	14	41	46
Membrana 1 después del segundo uso	1,3	0,17	0,57	4,0	0,23	12	42	46
Membrana 2 después del primer uso	1,4	0,18	0,58	0,45	0,26	13	39	48
Membrana 2 después del segundo uso	1,5	0,26	0,58	0,41	0,32	17	37	47

El estudio de resistencias de la Tabla 4.2 mostró diferencias claras entre las membranas y los ciclos de uso. En la membrana 1 tras el primer uso, el ensuciamiento estuvo dominado por la capa de torta (41 %), con un fouling irreversible del 17 %. Tras el segundo uso, estos valores aumentaron ligeramente, alcanzando 43,8 % y 17,7 %, respectivamente, lo que indica una mayor acumulación y persistencia del ensuciamiento.

En la membrana 2, se observó un comportamiento similar. En el primer uso, la capa de torta representa el 41,4 % y el fouling irreversible es menor (14,3 %), pero en el segundo uso este último aumenta hasta 20,7 %, acompañado de una reducción del fouling reversible. Esto sugiere una transición hacia formas de ensuciamiento más difíciles de remover con el uso acumulado.

En comparación con lo reportado en la literatura para jugo de kiwi, donde el fouling irreversible fue de solo 2,75 %, los valores obtenidos en este estudio confirmaron que el

jugo de maracuyá genera un ensuciamiento más severo y menos reversible, lo que implica mayores desafíos operativos en procesos de Ultrafiltración [17].

Estudio del ángulo de Contacto

La Tabla 4.3 muestra la medición del ángulo de contacto antes y después de la limpieza química y la rehidratación en etanol de la membrana de Ultrafiltración ocupada en modo concentración.

Tabla 4.3. Ángulo de contacto de la membrana UF antes del uso y después del protocolo de limpieza e hidratación en etanol

Estado de la membrana	Ángulo de contacto (°)
Membrana UF antes de usar	84,73 ± 0,83
Membrana UF después del lavado e hidratación en etanol	69,59 ± 3,52

En la Tabla 4.3 se observa una reducción significativa del ángulo de contacto después del proceso de limpieza en comparación con el valor original de la membrana sin uso. Esto indica que la superficie de la membrana se ha vuelto más hidrofílica tras la limpieza, lo cual suele asociarse con la eliminación parcial de contaminantes superficiales. Sin embargo, a pesar de esta mejora en la afinidad superficial con el agua, el flujo no se recuperó completamente, permaneciendo por debajo del valor inicial.

Estos resultados concuerdan con la evidencia reportada por Luján-Facundo et al. [24], donde se demuestra que los tratamientos de limpieza no solo remueven depósitos, sino que también pueden modificar la química superficial de la membrana. Este comportamiento se explica porque el grupo funcional del etanol involucrado en la rehidratación puede interactuar con la superficie polimérica de la membrana, favoreciendo la exposición o formación de grupos polares hidrofílicos como los —OH, lo que reduce el ángulo de contacto. No obstante, estos cambios superficiales no implican la restauración completa de la permeabilidad, ya que el fouling irreversible o alteraciones internas en la matriz de la membrana impiden la recuperación total del flujo. Así, la limpieza con etanol actúa modificando químicamente la superficie, aumentando su hidrofilia, pero no siempre es

suficiente para revertir daños o acumulación profunda que limitan la funcionalidad hidráulica original.

4.5 Ultrafiltración y Nanofiltración en modo concentración

La Figura 4.9 muestra la disminución del flujo de permeado en función del VRF (Factor de Reducción de Volumen) durante la concentración de jugo de maracuyá por Ultrafiltración utilizando AA y AB. El montaje y procedimiento de operación del equipo, así como la fórmula empleada para el cálculo del VRF, se detallan en el Anexo 7.10.

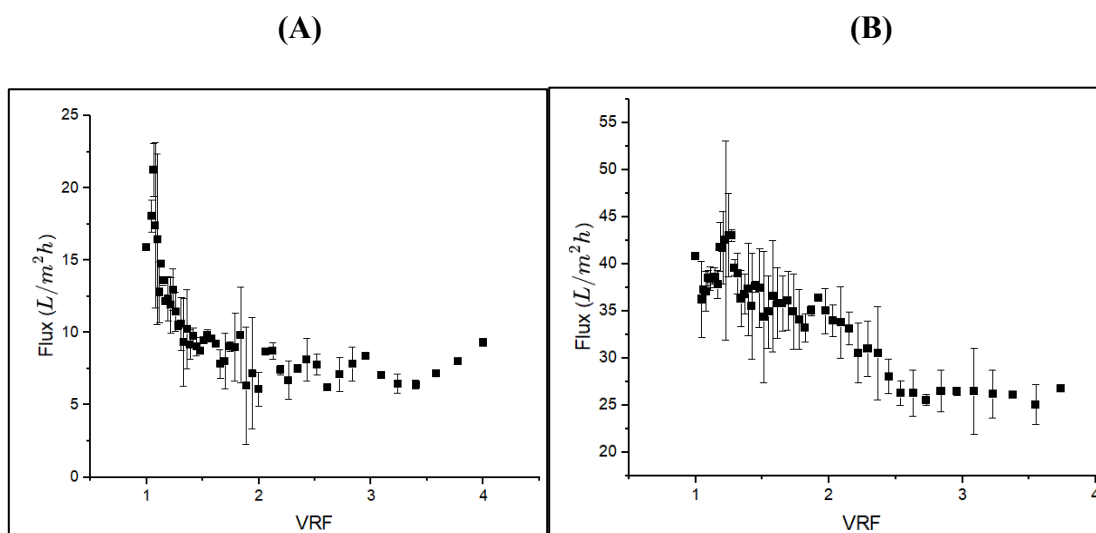


Figura 4.9. Disminución del flujo de permeado en función del VRF durante la concentración de jugo de maracuyá por Ultrafiltración con la membrana 1, en los experimentos AA (A) y AB (B).

En el experimento AA, la Membrana 1 inició con un flujo de aproximadamente 22 L/m²·h, disminuyendo rápidamente hasta estabilizarse en valores cercanos a 7 L/m²·h, y requiere un total de 6,9 horas para completar la concentración. En cambio, en la segunda corrida, el flujo inicial fue considerablemente más alto, cercano a 40 L/m²·h, y se mantuvo en valores superiores durante la mayoría del proceso, permitiendo completar la operación en solo 2,13 horas, el tiempo más corto de todos los ensayos. Sin embargo, en el experimento AB, se observó que el permeado tenía un color más oscuro, lo que sugiere una disminución en la eficiencia de retención de sólidos coloidales y compuestos colorantes. Esto podría explicarse por una pérdida de selectividad de la membrana o una limpieza insuficiente entre usos, lo que afectaría su capacidad de separación pese a mantener una alta permeabilidad hidráulica.

A continuación, se presentan en la Figura 4.11 los resultados obtenidos en modo concentración para la segunda membrana en Ultrafiltración utilizando BA y BB:

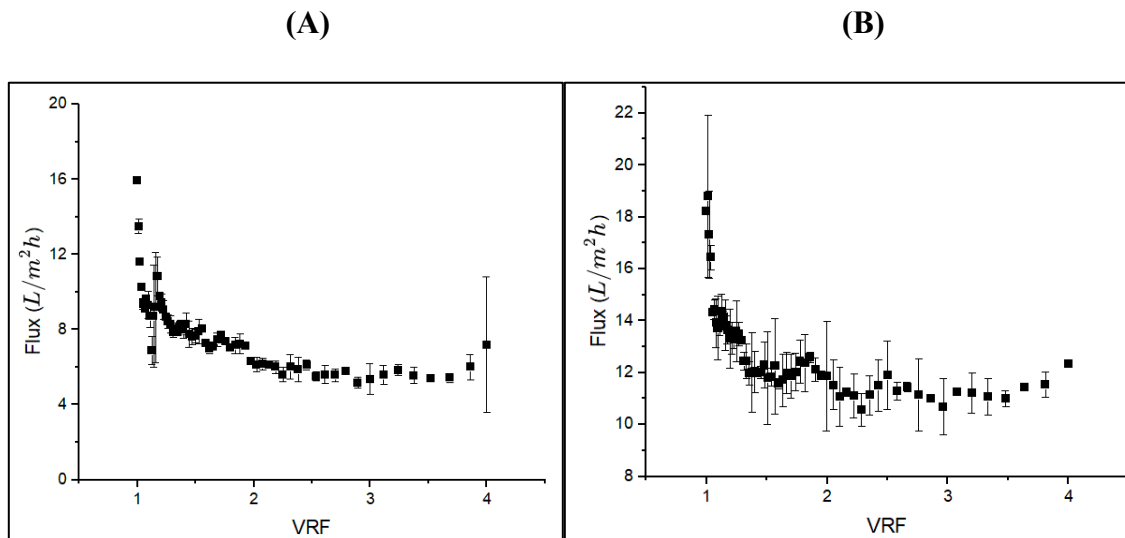


Figura 4.10. Disminución del flujo de permeado en función del VRF durante la concentración de jugo de maracuyá por Ultrafiltración con la membrana 2, en los experimentos BA (A) y BB (B).

En la Membrana 2, el flujo inicial fue más bajo en ambas réplicas (17 y 18 L/m²·h, respectivamente), con una disminución progresiva más moderada, alcanzando valores finales entre 6 y 12 L/m²·h. El tiempo total de operación fue mayor en ambas corridas: 11 horas en la primera y 6,5 horas en la segunda, lo que reflejó una menor eficiencia operativa. Aunque el caudal presentó una disminución más gradual y estable, en el segundo ciclo de operación se detectó un oscurecimiento del permeado, lo que corrobora la hipótesis de que la reutilización de la membrana sin una recuperación total de su selectividad compromete la calidad del producto.

Se obtuvieron los resultados en la Figura 4.11 para la Nanofiltración realizada dos veces con membranas distintas con el permeado obtenido en Ultrafiltración utilizando CC y DD:

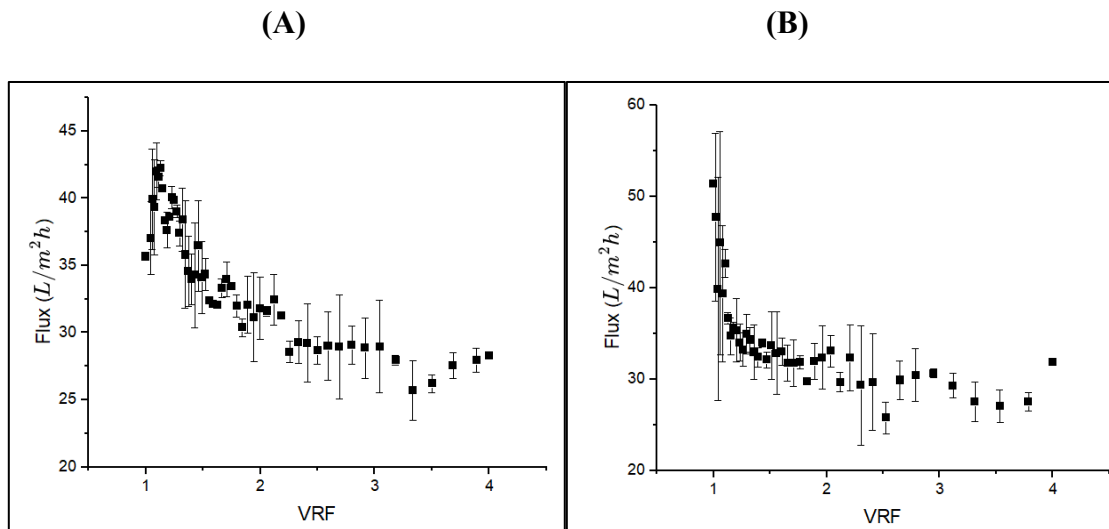


Figura 4.11. Disminución del flujo de permeado en función del VRF durante la concentración de jugo de maracuyá por Nanofiltración con la membrana 1 y 2, en los experimentos CC (A) y DD (B).

De la Figura 4.11 se evidencia que en el experimento 21, correspondiente a la primera membrana de NF, el flujo inicial fue cercano a 42 L/m²·h, disminuyendo de forma progresiva hasta estabilizarse en torno a 28–30 L/m²·h desde un VRF aproximado de 2. A pesar de la caída, el descenso fue más gradual que en las etapas de UF, lo que es esperable dado que el pretratamiento por Ultrafiltración ya eliminó la mayor parte de los sólidos suspendidos y macromoléculas responsables del fouling más agresivo. El proceso completo se llevó a cabo en aproximadamente 2 horas, lo cual refleja un tiempo de operación razonablemente eficiente para una etapa de NF, donde las presiones operativas son más elevadas y el caudal suele disminuir más rápidamente por la mayor selectividad de la membrana.

En el experimento 22, correspondiente a la segunda membrana de NF, se observó un flujo inicial incluso mayor, superando los 50 L/m²·h, lo que indica una membrana más permeable o menor resistencia inicial al paso del solvente. Sin embargo, el descenso del flujo fue más pronunciado en la primera parte del proceso, estabilizándose alrededor de 30–33 L/m²·h a partir de un VRF cercano a 1,5. Este perfil sugiere una rápida compactación de la capa superficial inicial, probablemente debida a interacciones entre compuestos fenólicos y la estructura de la membrana. No obstante, el proceso completo se desarrolló en solo 1,5 horas, lo que representó una mejora en velocidad respecto a la primera membrana.

4.6 Nanofiltración en modo concentración de una pasada

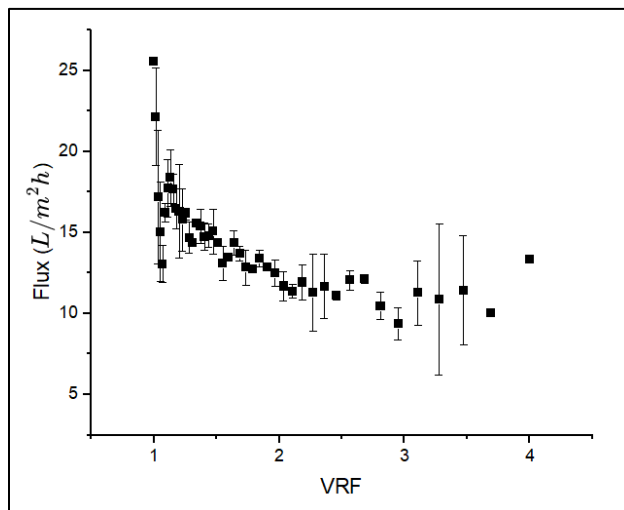


Figura 4.12. Disminución del flujo de permeado en función del VRF durante la concentración de jugo de maracuyá por Nanofiltración con una pasada con membrana 3 (exp EE)

La figura 4.12 presentada corresponde a la Nanofiltración directa del jugo de maracuyá, es decir, sin etapa previa de Ultrafiltración. El proceso tuvo una duración de aproximadamente 4 horas. Este tiempo es considerable, aunque comparable al de los procesos combinados de UF+ NF.

El flujo de permeado inicial alcanzó valores cercanos a 26 L/m²·h, pero mostró un descenso abrupto en los primeros momentos del proceso, estabilizándose entre 10 y 13 L/m²·h a partir de un VRF aproximado de 1,5. Esta tendencia refleja un ensuciamiento rápido de la membrana, probablemente asociado a la alta carga de sólidos, compuestos coloidales y materia orgánica presentes en el jugo sin pretratamiento, lo que favorece la formación temprana de una capa superficial densa.

4.7 Evaluación de parámetros de calidad del jugo concentrado

A continuación, se analizaron los resultados obtenidos de la turbidez, vitamina C, polifenoles y grados Brix para la solución inicial, el permeado y el retenido de la Ultrafiltración y Nanofiltración.

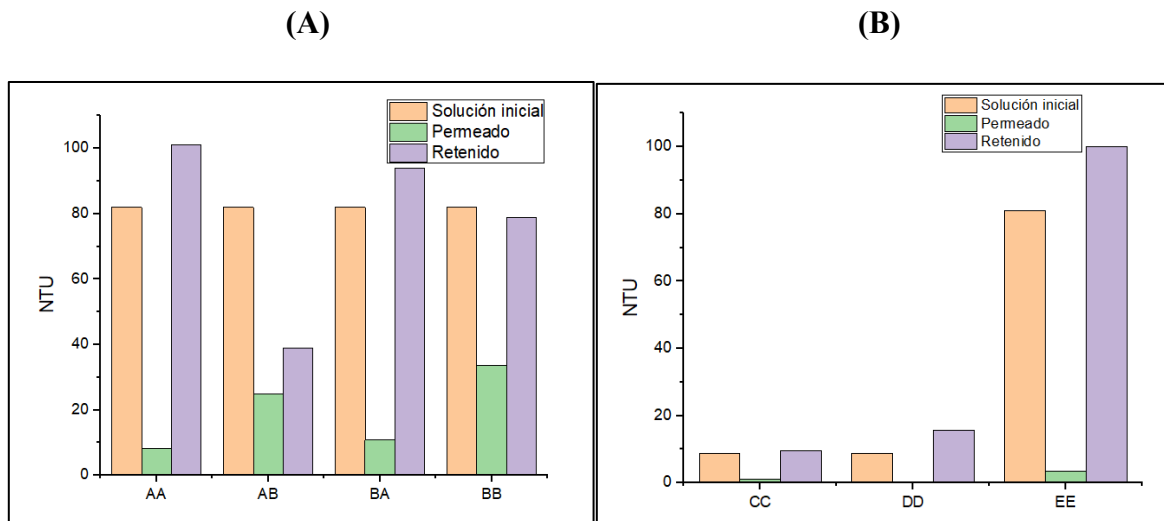


Figura 4.14. Valores de turbidez (NTU) en solución inicial, permeado y retenido para cada experimento durante la Ultrafiltración (A) y Nanofiltración (B) del jugo de maracuyá.

Los resultados obtenidos evidenciaron que la reutilización de las membranas en Ultrafiltración reduce su efectividad en la clarificación del jugo de maracuyá. Esto se refleja en el aumento de la turbidez (NTU) del permeado cuando la membrana es utilizada por segunda vez, tanto para la membrana 1 como para la membrana 2. En el caso de la membrana 1, el primer uso permitió obtener un permeado con menor turbidez y el proceso demoró 6,9 horas en concentrar; sin embargo, en el segundo uso, aunque el tiempo de concentración fue menor (2,13 horas), la turbidez del permeado fue mayor, indicando una menor capacidad de retención de partículas y compuestos coloidales. Un comportamiento similar se observó con la membrana 2, donde el primer uso requirió 11 horas y el segundo 6,5 horas, pero en ambos casos la reutilización se asoció a un aumento del NTU en el permeado.

Este fenómeno puede atribuirse al ensuciamiento y la colmatación progresiva de la membrana, que reduce su permeabilidad y selectividad, afectando tanto la calidad del producto como la eficiencia operativa. La literatura señala que, a medida que las membranas acumulan sólidos y compuestos orgánicos en su superficie o en sus poros, disminuye su capacidad de retención y aumenta la resistencia al flujo, lo que puede explicar la reducción en el tiempo de proceso y el deterioro en la calidad del permeado. Si bien existen estrategias de limpieza como el retrolavado o la limpieza química para restaurar

parcialmente la permeabilidad, la efectividad de la membrana tiende a disminuir con el uso repetido si no se implementan procedimientos de mantenimiento adecuados [25]. La literatura ha documentado que, a medida que las membranas acumulan materia orgánica como pectinas, proteínas y polifenoles, forman una capa de gel y su capacidad de separación disminuye, ya sea por bloqueo de poros o por la formación de una capa superficial densa [26]. Este tipo de ensuciamiento puede incrementar el rechazo aparente de ciertos solutos debido a la disminución efectiva del tamaño de poro, pero sacrificando la permeabilidad de la membrana y duración del proceso continuo de filtración. Además, el pH juega un papel fundamental en este ensuciamiento; en condiciones de pH ácido, típicas del maracuyá, se favorece la formación de dicha capa gel debido a la menor repulsión electrostática entre las moléculas y la membrana, incrementando así la polarización de concentración y la obstrucción[27].

Métodos de limpieza como retrolavado o limpiezas químicas alcalinas destacan por su efectividad en membranas de poliamida, sin embargo, su uso es limitado, debido a la sensibilidad de la superficie a la exposición de agentes agresivos como ácido y bases. Esto refuerza la necesidad de establecer protocolos de limpieza más selectivos y compatibles con la naturaleza de los compuestos adheridos en la superficie presentes en el contenido del maracuyá.

En contraste, en los experimentos de Nanofiltración se utilizaron membranas distintas para cada ensayo, lo que permitió mantener una alta eficiencia en la remoción de sólidos y compuestos de bajo peso molecular, obteniendo permeados con baja turbidez y retenidos altamente concentrados. La Nanofiltración, al emplear membranas nuevas o bien mantenidas, muestra un rendimiento más estable y consistente, lo que resalta la importancia de la selección y el mantenimiento de las membranas en procesos secuenciales de concentración y clarificación de jugos.

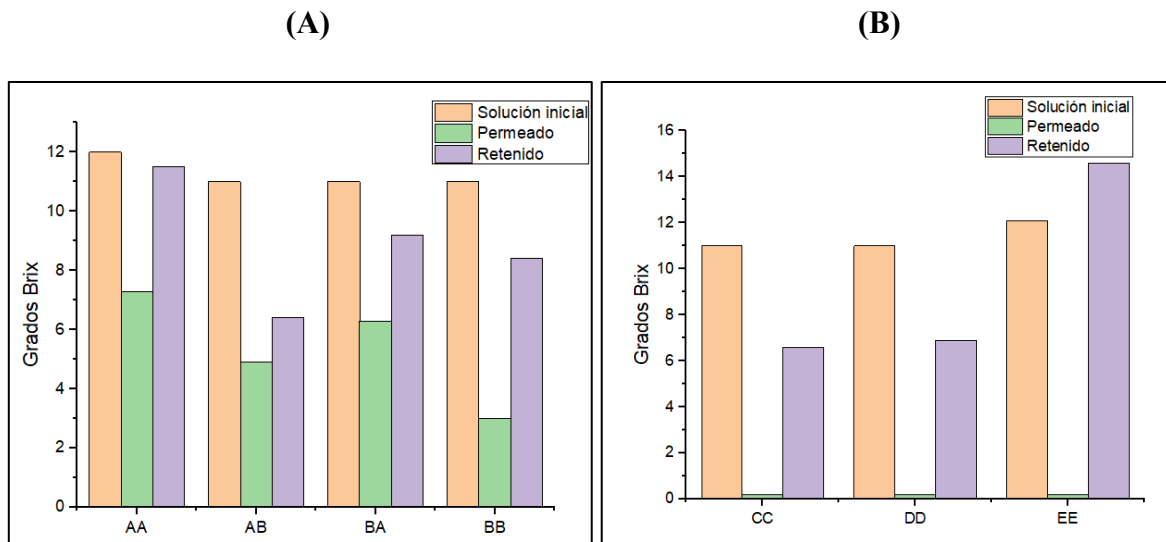


Figura 4.15. Valores de Grados Brix en solución inicial, permeado y retenido para cada experimento durante la Ultrafiltración (A) y Nanofiltración (B) del jugo de maracuyá.

En los experimentos de Ultrafiltración, los grados Brix de la solución inicial se mantienen entre 10,5 y 12, lo que corresponde al 100% del contenido de sólidos solubles del jugo fresco. En el primer uso de la membrana 1, el permeado presentó un valor de 7,3 grados Brix, lo que representa una reducción del 38% respecto a la solución inicial (es decir, el permeado retiene aproximadamente el 62% de los sólidos solubles). En el segundo uso, el permeado disminuyó a 4,9 grados Brix, equivalente a una reducción del 58%, mostrando una mayor retención de sólidos solubles en el permeado, pero al mismo tiempo, el retenido baja de 11,5 a 6,4 grados Brix, es decir, pasa de concentrar un 98% a un 54% respecto a la solución inicial, lo que indica una pérdida significativa en la capacidad de concentración de la membrana tras su reutilización.

Para la membrana 2, en el primer uso, el permeado tuvo una medición de 6,3 grados Brix, equivalente a una reducción del 39% respecto a la solución inicial, mientras que en el segundo uso el permeado aumentó a 3 grados Brix, con una reducción del 71%, mostrando una mayor retención de sólidos solubles en el permeado, pero el retenido disminuyó de 9,2 a 8,4 grados Brix, es decir, de un 88% a un 81% de concentración relativa, lo que también indica una menor eficiencia en la concentración tras el segundo uso.

En cuanto a la Nanofiltración, los experimentos CC y DD, que utilizan como alimentación el permeado de Ultrafiltración con aproximadamente 11 grados Brix, mostraron permeados con sólo 0,2 grados Brix, es decir, una reducción del 98%, lo que indicó una alta eficiencia en la remoción de sólidos solubles. El retenido en estos casos concentra entre un 60% y 63% respecto a la alimentación. En el experimento 23, donde se procesa la solución inicial directamente con 12,1 grados Brix, el permeado también presentó un valor muy bajo (0,2 grados Brix, reducción del 98%), pero el retenido alcanza 14,6 grados Brix, equivalente a un 121% de concentración relativa, evidenciando una fuerte capacidad de concentración sin pretratamiento.

Estos porcentajes reflejaron claramente que la Ultrafiltración pierde eficiencia en la concentración y retención de sólidos solubles cuando se reutilizan las membranas, mientras que la Nanofiltración mantuvo una alta capacidad de separación, especialmente cuando se trabaja con membranas nuevas o bien mantenidas.

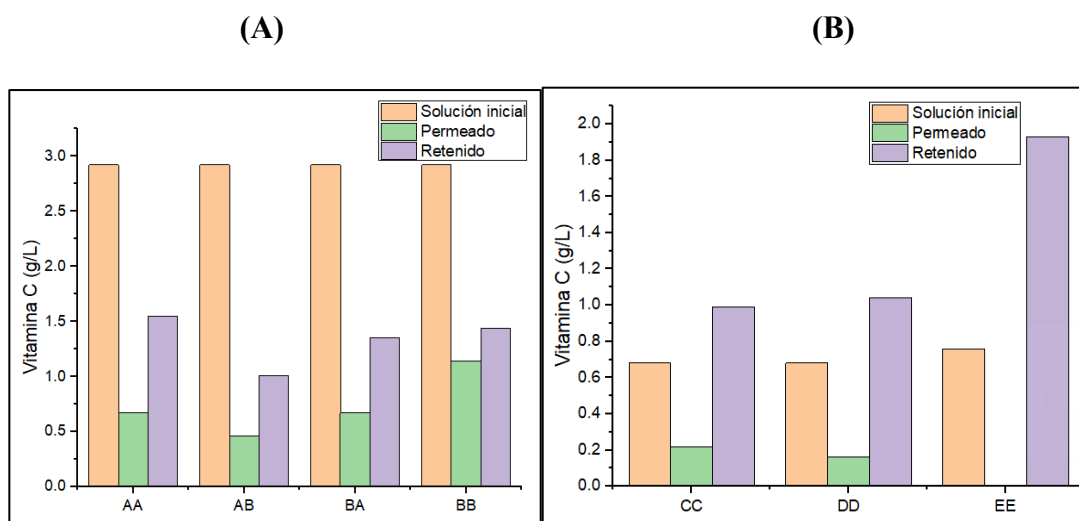


Figura 4.16. Valores de Vitamina C en solución inicial, permeado y retenido para cada experimento durante la Ultrafiltración (A) y Nanofiltración (B) del jugo de maracuyá.

En los procesos de Ultrafiltración, se observó que la membrana 1 presentó una capacidad de retención moderada. En el experimento AA, el retenido concentró un 53,05 % de la vitamina C respecto a la concentración inicial, mientras que en el experimento AB, este valor fue de 34,56 %, evidenciando una caída en el rendimiento, posiblemente atribuible a condiciones operativas o limpieza de la membrana. Sin embargo, el permeado en ambos casos mostró una pérdida del 22,98 % y 15,78 % respectivamente, lo que indicó que una

proporción relevante de vitamina C logró atravesar la membrana. En contraste, la membrana 2 mostró mejores niveles de concentración en el retenido, alcanzando un 46,18 % y 49,29 % en los experimentos BA y BB respectivamente, con una menor proporción retenida en el permeado del 22,98 % y 39,25 % respectivamente. Estos datos sugieren que, aunque la membrana 2 permitió mayor paso de vitamina C al permeado en el experimento BB, también logró una mayor recuperación en el concentrado final.

En cuanto a la Nanofiltración, los experimentos CC y DD emplearon como alimentación el permeado de la Ultrafiltración (específicamente de membrana 1), con concentraciones iniciales significativamente más bajas (0,6831 g/L). A pesar de ello, el retenido logró recuperar 145,7 % (CC) y 153,2 % (DD) de la vitamina C respecto al valor inicial de alimentación, lo cual es posible gracias a la eliminación de agua durante el proceso. Este comportamiento sugiere una altísima eficiencia de concentración, incluso a partir de soluciones diluidas. El experimento 23, que utilizó directamente la solución inicial del jugo (0.7656 g/L), mostró el mejor rendimiento global: una recuperación del 253,1 % de vitamina C en el concentrado, confirmando la elevada selectividad de la membrana de Nanofiltración.

En términos comparativos, mientras que en la Ultrafiltración el porcentaje de recuperación en el retenido osciló entre 34 % y 53 %, en la Nanofiltración se obtuvieron incrementos de hasta 153 % con permeados y más del 250 % con jugo fresco, lo que demuestra una capacidad significativamente mayor para la concentración de vitamina C. Esto refuerza la utilidad de la Nanofiltración no solo como una etapa final de concentración, sino también como una herramienta de recuperación de compuestos valiosos que pudieron perderse parcialmente en etapas previas. Estos resultados coincidieron con los reportados en estudios recientes sobre el uso de tecnologías de membrana en la industria de jugos. Según Castro (2024) [28], la Nanofiltración ha demostrado ser altamente eficaz en la concentración de compuestos hidrosolubles de bajo peso molecular, como la vitamina C, debido a su bajo corte de peso molecular (MWCO) y a su capacidad para operar a temperaturas suaves que minimizan la degradación térmica de compuestos sensibles. En particular, se destacó que las membranas de Nanofiltración pueden alcanzar rechazos superiores al 90 % para

vitaminas y antioxidantes, con mejoras significativas en la estabilidad del producto final y en la eficiencia de concentración en comparación con otras técnicas como la Ultrafiltración.

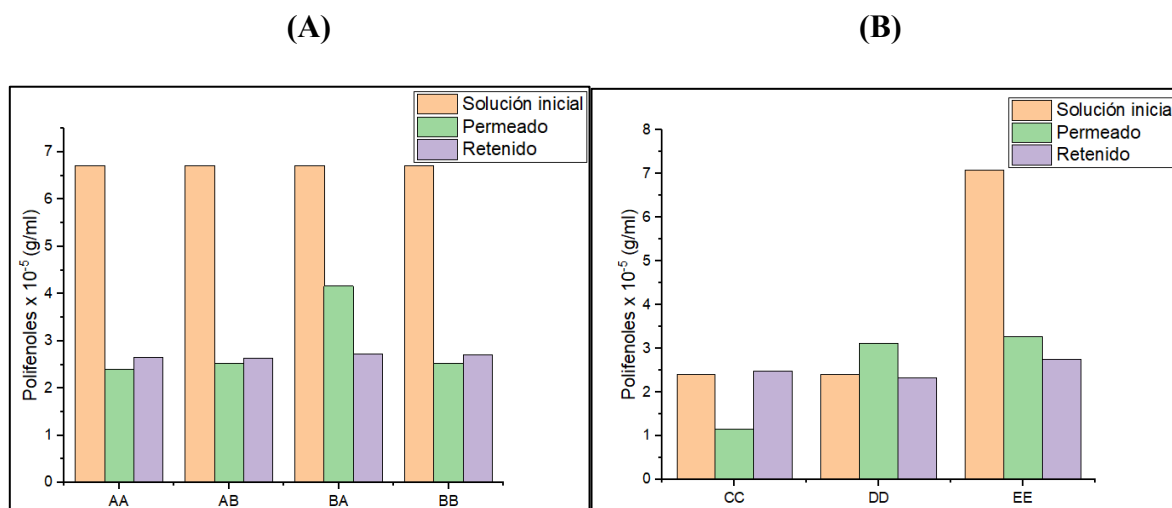


Figura 4.17. Valores de los polifenoles en solución inicial, permeado y retenido para cada experimento durante la Ultrafiltración (A) y Nanofiltración (B) del jugo de maracuyá.

En los resultados obtenidos, la eficiencia de concentración de polifenoles en los experimentos de Ultrafiltración fue baja, mostrando una recuperación en el retenido que varió entre el 39,4% y el 40,5%, mientras que las pérdidas hacia el permeado alcanzaron hasta un 62,1% en el experimento BA. Esto indica que, a pesar de haber reducido el volumen a una cuarta parte respecto al inicial, la cantidad de polifenoles en el concentrado no aumentó proporcionalmente. Esto es consistente con el tamaño de poro de la membrana utilizada (100 kDa), el cual permite el paso de compuestos fenólicos de bajo peso molecular. Este comportamiento coincide con lo señalado en investigaciones, donde se reportaron que membranas de Ultrafiltración con alto MWCO no retienen eficientemente polifenoles, reduciendo su presencia en la fracción concentrada [29].

Por el contrario, en los experimentos de Nanofiltración, que usaron como alimentación el permeado de Ultrafiltración, la recuperación en el retenido fue significativamente mayor, entre 96,7% y 102,9%, y las pérdidas al permeado menores al 13%, con un desempeño muy eficiente de retención incluso a partir de una solución diluida. En el experimento EE, donde se aplicó Nanofiltración directamente sobre jugo fresco sin pasar por etapa previa, la recuperación alcanzó un 38,9%, con una pérdida mínima del 4,6%, confirmando la

capacidad de la membrana para retener polifenoles cuando la concentración inicial es alta y sin un paso intermedio que reduzca la carga fenólica.

Estos resultados respaldaron la afirmación de Parvarei et al. [29] de que la Nanofiltración, debido a su menor tamaño de poro y mayor selectividad, es más adecuada para conservar compuestos bioactivos como los polifenoles en jugos. Sin embargo, la eficiencia efectiva de concentración no depende únicamente de las propiedades de la membrana, sino también de la concentración inicial y la forma química de los polifenoles presentes en la matriz. En este sentido, se observa que la baja concentración final de polifenoles se debe principalmente a la etapa previa de Ultrafiltración, la cual limita considerablemente la cantidad de polifenoles disponible para la Nanofiltración. Por lo tanto, aunque la Nanofiltración muestra una alta capacidad para preservar y concentrar los compuestos que recibe en su alimentación, esta eficiencia queda condicionada por las pérdidas y limitaciones ocurridas en la primera etapa. Esto evidencia que en procesos secuenciales la selección y optimización tanto de la etapa inicial como de la etapa posterior son fundamentales para lograr una concentración efectiva y conservar los compuestos bioactivos de interés.

5. Conclusiones

Los resultados de la investigación demostraron que las tecnologías de membrana son una alternativa eficaz para concentrar jugo de maracuyá a temperatura ambiente, pero su desempeño depende fuertemente del tipo de membrana y de la estrategia de limpieza empleada.

La Ultrafiltración (UF) funcionó de manera óptima como etapa de clarificación inicial: disminuyó la turbidez y redujo sólidos suspendidos, pero su flujo cayó con rapidez por la formación de una torta orgánica sobre la superficie. Tras un solo ciclo, la membrana alcanzó concentrados cercanos a 11 °Brix; al reutilizarla, la capacidad de concentración se redujo casi a la mitad y el permeado incrementó el NTU obteniendo valores de hasta 33,74. En base lo anterior, el ensuciamiento demostró ser un factor crítico que limita la vida útil y el rendimiento de UF en jugos con alta carga coloidal como el maracuyá.

La Nanofiltración (NF) mostró una operación más estable y selectiva. Con jugo fresco produjo los mayores grados Brix (14,6) y retuvo la mayor fracción de vitamina C (121%) y polifenoles ($\approx 0,98$), evidenciando la ventaja de su menor corte molecular para concentrar compuestos de interés mientras elimina agua rápidamente. Cuando NF se alimentó con el permeado de UF se obtuvo valores altos en vitamina C, aunque la velocidad de proceso disminuyó levemente por la reducción de carga osmótica.

El análisis del ensuciamiento indicó que el mecanismo predominante correspondió al modelo de formación de torta, caracterizado por la acumulación progresiva de sólidos, como las pectinas y proteínas, sobre la superficie de la membrana y responsable principal de la pérdida de flujo. La estrategia de limpieza condicionó fuertemente la recuperación de permeabilidad. Los lavados con agua o soluciones alcalinas sólo devolvieron un tercio a la mitad del flujo original; la inmersión en etanol liberó compuestos hidrofóbicos y devolvió más del 80 % de la capacidad hidráulica tras el primer ciclo. Aun así, el ensuciamiento irreversible es acumulativo y obliga a programar recambios o limpiezas más rigurosas tras varios usos.

6. Referencias

- [1] Álvarez Rollán, A. (2011). *Comparativa técnica, energética y económica de tres operaciones de concentración en la industria alimentaria: La evaporación, la tecnología de membranas y la criocentración* Universitat Politècnica de Catalunya].
- [2] Pino, L. (2013). *Concentraci3n de jugo de cranberries (vaccinium macrocarpon ait.) mediante destilaci3n osm3tica: analisis de la cinetica de concentraci3n en condiciones de escalamiento de bajo requerimiento energetico* Universidad de Santiago de Chile].
- [3] Hernández, . -d., & Bull3n-Torrealba, J. (2013). La concentraci3n de jugos de fruta: Aspectos básicos de los procesos sin y con membrana. *Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela*, 28(3), 65-75.
- [4] Ilame, S. A. (2015). Aplicaci3n de la separaci3n por membranas en el procesamiento de jugos de frutas y verduras: una revisi3n. *Food Science and Nutrition*, 55. <https://doi.org/10.1080/10408398.2012.679979>
- [5] Campos-Rodríguez, J., Acosta-Coral, K., Moreno-Rojo, C., & Paucar-Menacho, L. M. (2023). Maracuyá (Passiflora edulis): Composici3n nutricional, compuestos bioactivos, aprovechamiento de subproductos, biocontrol y fertilizaci3n orgánica en el cultivo. *Scientia Agropecuaria*, 14(4), 479-497.
- [6] Corredor, M. P. P. (2024). *Maracuyá: origen, tipos y características*. mejor con salud Recuperado el 18 de marzo de <https://mejorconsalud.as.com/maracuya-origen-tipos-caracteristicas/>
- [7] Bridge, D. (2025). *Informe de análisis del tamaño, la participaci3n y las tendencias del mercado mundial de maracuyá: panorama general del sector y pron3stico hasta 2032*.
- [8] Chiranjit Bhattacharjee. (2017). Procesamiento de jugos de frutas mediante tecnología de membranas: una revisi3n. *Ciencia de los alimentos innovadora y tecnologías emergentes*.
- [9] Chiranjit Bhattacharjee. (2017). Watermelon juice concentration using ultrafiltration: Analysis of sugar and ascorbic acid. *Food Science and technology internacional*.
- [10] Cassano, A. (2011). Clarification and concentration of pomegranate juice (Punica granatum L.) using membrane processes. *Journal of Food Engineering*.
- [11] Arriola, N. A. (2013). Potential of nanofiltration for the concentration of bioactive compounds from watermelon juice. *International Journal of Food Science and Technology*.
- [12] Priscila Castillo Soto , L. M. S. (1995). *Cinética de la degradaci3n de la vitamina C en el jugo concentrado y congelado de maracuyá*
- [13] Carrasco, A. (2025). *Evaluaci3n técnica de la elaboraci3n de membranas revalorizadas desde membranas desechadas de osmosis inversa para el tratamiento del agua gris* Universidad de Concepci3n].
- [14] L. Pino, C. V., A. Schwarz, R. Borquez. (2018). Influence of operating conditions on the removal of metals and sulfate from copper acid mine drainage by nanofiltration. *Chemical Engineering Journal*.

- [15] Joyce Bueno Mafra , D. C., Gastón Merlet Venturelli. (2025). Concentración de jugo de maracuyá a temperatura ambiente mediante destilación osmótica. *REVISTA CADERNO PEDAGÓGICO*.
- [16] Y. Kaya , Z. B. G., I. Vergili, H. Barlas. (2009). The effect of transmembrane pressure and pH on treatment of paper machine process waters by using a two-step nanofiltration process: Flux decline analysis. *Desalination*.
- [17] A. Cassano, L. D., E. Drioli. (2006). Ultrafiltration of kiwifruit juice: Operating parameters, juice quality and membrane fouling. *Journal of Food Engineering*.
- [18] Toledo, M. (s.f.). *Medición del pH del zumo de frutas*.
- [19] Maya, E. M. R. (2002). *Nuevo método por espectrofotometría UV con segunda derivada para la determinación ácido ascórbico en jugos de fruta procesados* [Universidad Nacional Autónoma de México].
- [20] A Cassano , E. D., G Galaverna , R Marchelli , G Di Silvestro , P Cagnasso (2003). Clarification and concentration of citrus and carrot juices by integrated membrane processes. *Journal of Food Engineering*.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(02\)00293-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0260-8774(02)00293-5)
- [21] Rui Carlos Castro Domingues , A. A. R., Vicelma Luiz Cardoso , Miria Hespagnol Miranda Reis (2014). Microfiltration of passion fruit juice using hollow fibre membranes and evaluation of fouling mechanisms. *Journal of Food Engineering*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2013.07.037>
- [22] Cheng Lu, Y. B., Jen-Yi Huang (2021). Fouling in membrane filtration for juice processing. *Current Opinion in Food Science*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cofs.2021.05.004>
- [23] ADRIANA PATRICIA PULIDO-DÍAZ, F. F.-L., SERGIO ANDRÉS CABRERA-NAVARRO. (2016). EVAPORACIÓN OSMÓTICA: FUNDAMENTOS Y APLICACIONES EN LA CONCENTRACIÓN DE JUGOS DE FRUTA. *Biotecnología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*.
[https://doi.org/10.18684/BSAA\(14\)135-144](https://doi.org/10.18684/BSAA(14)135-144)
- [24] M.J. Luján-Facundo, J. A. M.-R., B. Cuartas-Uribe, S. Álvarez-Blanco. (2015). Evaluation of cleaning efficiency of ultrafiltration membranes fouled by BSA using FTIR–ATR as a tool. *Journal of Food Engineering*.
- [25] Cataluña, U. P. d. (s.f.). ANEJO A. MEMBRANAS (ULTRAFILTRACIÓN). In *Comparativa de ampliación E.D.A.R. mediante reactor biológico convencional o MBR*.
- [26] Semia Baklouti, R. E.-G., Abir Mokni, Semia Chaabouni. (2011). Clarification of pomegranate juice by ultrafiltration: study of juice quality and of the fouling mechanism.
- [27] C.A. Solís , C. A. V., J.S. Ramírez-Navas. (2017). Tecnología de membranas: Ultrafiltración. *Entre Ciencia e Ingeniería 11*.
- [28] Castro-Muñoz, R. (2024). *Nanofiltration-Assisted Concentration Processes of Phenolic Fractions and Carotenoids from Natural Food Matrices*
- [29] Parvarei, M., Khorshidian, N., Yousefi, M., Zendeboodi, F., & Mirsaedghazi, H. (2022). Parvarei, M., Khorshidian, N., Yousefi, M., Zendeboodi, F., & Mirsaedghazi, H. (2022). Effect of membrane clarification on the physicochemical properties of fruit juices: A review. *Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering (IJCCE)*, 41(10).

7. Anexos

Anexo 7.1 Tabla de permeabilidades de la membrana de Ultrafiltración

Membrana 1:

Tabla 7.1. Permeabilidad hidráulica de la membrana limpia con agua a distintas presiones.

Permeabilidad de la membrana limpia con agua						
Presión [bar]	3		4		5	
Muestra	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]
1	76,30	23	102,94	22	131,73	22
2	72,68	23	98,86	22	130,28	22
3	69,65	23	95,17	23	125,81	23

Tabla 7.2. Permeabilidad hidráulica de la membrana durante la filtración de jugo de maracuyá.

Permeabilidad de la membrana con jugo de maracuyá						
Presión [bar]	3		4		5	
Muestra	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]
1	43,48	20	52,95	23	77,05	22
2	45,24	21	55,44	22	77,22	22
3	41,68	21	55,33	22	76,25	22

Permeabilidad con agua después del primer uso:

Tabla 7.3. Permeabilidad hidráulica de la membrana después del primer uso, después del lavado con agua

Membrana saturada después del lavado con agua						
Presión [bar]	3		4		5	
Muestra	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]
1	20,73	22	30,26	22	49,61	22
2	24,69	22	31,59	22	44,47	22
3	20,27	22	32,27	22	48,11	22

Tabla 7.4. Permeabilidad hidráulica de la membrana después del primer uso, después del lavado básico

Membrana después del lavado básico						
Presión [bar]	3		4		5	
Muestra	J_p	Temperatura [°C]	J_p	Temperatura [°C]	J_p	Temperatura [°C]

	[L/m ² h]		[L/m ² h]		[L/m ² h]	
1	37,48	21	46,95	22	60,96	22
2	35,17	21	46,42	22	59,66	23
3	36,62	21	45,64	22	60,16	23

Tabla 7.5. Permeabilidad hidráulica de la membrana después del primer uso, después de rehidratación en etanol

Membrana después de hidratación en etanol						
Presión [bar]	3		4		5	
Muestra	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]
1	61,08	24	88,52	23	103,02	23
2	61,04	25	86,66	23	102,75	23
3	60,44	24	87,02	23	105,93	22

Permeabilidad con agua después del segundo uso

Tabla 7.6. Permeabilidad hidráulica de la membrana después del segundo uso, después del lavado con agua

Membrana saturada después del lavado con agua						
Presión [bar]	3		4		5	
Muestra	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]
1	15,51	22	22,50	22	34,70	22
2	17,25	22	24,01	22	36,00	22
3	14,80	22	21,60	22	33,60	22

Tabla 7.7. Permeabilidad hidráulica de la membrana después del segundo uso, después del lavado básico

Membrana después del lavado básico						
Presión [bar]	3		4		5	
Muestra	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]
1	26,00	21	35,50	22	48,00	22
2	24,50	22	33,90	22	46,20	22
3	25,02	22	34,20	22	47,00	22

Tabla 7.8. Permeabilidad hidráulica de la membrana después del segundo uso, después de la rehidratación en etanol

Membrana después de hidratación en etanol						
Presión [bar]	3		4		5	
Muestra	J_p	Temperatura	J_p	Temperatura	J_p	Temperatura

	[L/m ² h]	[°C]	[L/m ² h]	[°C]	[L/m ² h]	[°C]
1	44,00	23	63,50	22	79,80	22
2	43,80	22	62,10	22	80,10	23
3	43,02	22	62,84	22	78,70	23

Membrana 2:

Tabla 7.9. Permeabilidad hidráulica de la membrana limpia con agua a distintas presiones.

Permeabilidad de la membrana limpia con agua						
Presión [bar]	3		4		5	
Muestra	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]
1	65,07	21	79,84	21	93,71	21
2	60,37	21	75,60	21	96,15	21
3	59,62	21	75,80	21	90,72	21

Tabla 7.10. Permeabilidad hidráulica de la membrana durante la filtración de jugo de maracuyá

Permeabilidad de la membrana con jugo de maracuyá								
Presión [bar]	2		3		4		5	
Muestra	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]
1	3,22	21	8,26	20	9,55	21	10,75	21
2	3,16	21	7,37	20	8,76	21	10,03	21
3	3,07	21	6,89	20	8,63	21	9,75	21

Permeabilidad con agua después del primer uso:

Tabla 7.11. Permeabilidad hidráulica de la membrana después del primer uso, después del lavado con agua

Membrana saturada después del lavado con agua						
Presión [bar]	3		4		5	
Muestra	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]
1	19,44	21	28,15	21	31,45	21
2	17,44	21	21,75	21	31,65	21
3	16,56	21	21,51	21	31,26	21

Tabla 7.12. Permeabilidad hidráulica de la membrana después del primer uso, después del lavado básico

Membrana después del lavado básico						
Presión [bar]	3		4		5	

Muestra	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]
1	30,63	19	33,08	19	38,16	19
2	26,80	19	31,39	19	37,38	19
3	24,47	19	30,85	19	36,00	19

Tabla 7.13. Permeabilidad hidráulica de la membrana después del primer uso, después de rehidratación en etanol

Membrana después de hidratación en etanol						
Presión [bar]	3		4		5	
Muestra	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]
1	52,05	20	55,82	20	64,94	20
2	48,05	20	53,33	20	63,90	20
3	45,62	20	52,09	20	63,21	20

Permeabilidad con agua después del segundo uso

Tabla 7.14. Permeabilidad hidráulica de la membrana después del segundo uso, después del lavado con agua

Membrana saturada después del lavado con agua						
Presión [bar]	3		4		5	
Muestra	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]
1	19,04	20	25,18	20	29,02	20
2	19,03	20	24,93	20	30,11	20
3	18,84	20	24,65	20	29,98	20

Tabla 7.15. Permeabilidad hidráulica de la membrana después del primer uso, después del lavado básico

Membrana después del lavado básico						
Presión [bar]	3		4		5	
Muestra	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]
1	20,06	20	25,01	20	29,51	20
2	19,73	20	24,75	20	29,29	20
3	19,37	20	24,64	20	28,83	20

Tabla 7.16. Permeabilidad hidráulica de la membrana después del primer uso, después de rehidratación en etanol

Membrana después de hidratación en etanol						
Presión	3		4		5	

[bar]						
Muestra	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]
1	38,17	18	44,43	18	53,28	18
2	36,38	18	43,48	18	52,84	18
3	34,90	18	42,83	18	51,99	18

Anexo 7.2 Tabla de permeabilidades de la membrana de Nanofiltración

Membrana 1

Tabla 7.17. Permeabilidad hidráulica de la membrana 1 limpia con agua a diferentes presiones.

Permeabilidad de la membrana limpia con agua						
Presión [bar]	20		30		35	
Muestra	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]
1	64,01	23	92,69	23	102,68	24
2	63,99	23	88,14	23	101,04	24
3	58,16	23	85,85	23	101,56	24

Tabla 7.18. Permeabilidad hidráulica de la membrana 1 con jugo de maracuyá.

Permeabilidad de la membrana con jugo de maracuyá								
Presión [bar]	20		25		30		35	
Muestra	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]
1	22,02	22	27,46	22	33,41	22	37,92	21
2	21,05	22	27,24	22	33,02	22	37,69	21
3	20,30	22	26,99	22	32,62	22	37,09	21

Membrana 2:

Tabla 7.19. Permeabilidad hidráulica de la membrana 2 limpia con agua a diferentes presiones

Permeabilidad de la membrana limpia con agua						
Presión [bar]	20		30		35	
Muestra	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]
1	57,96	21	77,71	21	92,83	22
2	56,20	21	75,45	21	92,03	22
3	55,20	21	73,11	21	91,07	22

Membrana 3:

Tabla 7.20. Permeabilidad hidráulica de la membrana 3 limpia con agua a diferentes presiones

Permeabilidad de la membrana limpia con agua						
Presión [bar]	20		30		35	
Muestra	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]
1	69,64	19	79,61	20	95,06	21
2	66,65	19	77,29	20	94,24	21
3	64,06	19	74,90	20	93,26	21

Membrana 4:

Tabla 7.21. Permeabilidad hidráulica de la membrana 3 limpia con agua a diferentes presiones

Permeabilidad de la membrana limpia con agua						
Presión [bar]	20		30		35	
Muestra	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]	J_p [L/m ² h]	Temperatura [°C]
1	73,78	19	102,82	20	110,91	21
2	66,93	19	94,28	20	107,78	21
3	63,91	19	92,83	20	106,66	21

Anexo 7.3 Determinación de la densidad y viscosidad del jugo de maracuyá

Se determinaron las densidades y viscosidades del jugo de maracuyá a distintas temperaturas, todas ellas por debajo de los 30 °C, con el fin de evitar la pérdida de propiedades características de la fruta. Las mediciones se realizaron utilizando un densímetro modelo Density Meter DMA 4500 M y un microviscosímetro modelo Lovis 200 ME.

Se obtuvieron los siguientes resultados

Tabla 7.22. Densidad y viscosidad del jugo de maracuyá a distintas temperaturas

Temperatura (Celsius)	Viscosidad dinámica (Pa*s)	Viscosidad cinemática (m ² /s)	Densidad (kg/L)
17	0.001797	0.001719	1.04523
20	0.001683	0.001611	1.04451
22.5	0.00154	0.001476	1.0437

25	0.001449	0.00139	1.04292
27.5	0.001372	0.001316	1.04212

Se hizo un ajuste lineal obteniendo los siguientes gráficos:

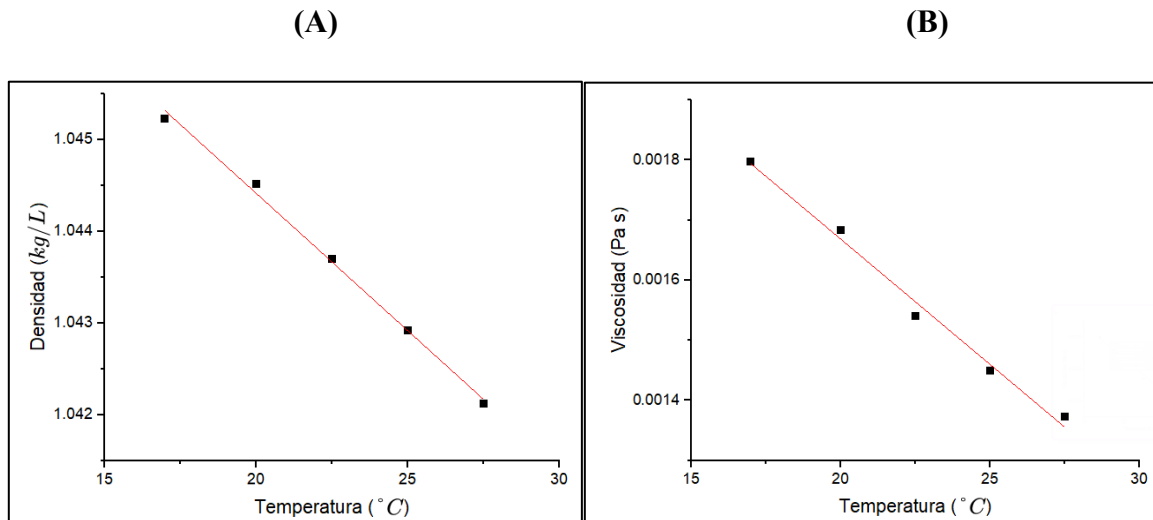


Figura 7.1. Ajuste lineal de las propiedades del jugo de maracuyá en función de la temperatura: (A) Densidad en función de la temperatura y (B) Viscosidad en función de la temperatura.

Con las ecuaciones obtenidas en el gráfico se puede determinar la viscosidad y densidad a cualquier temperatura entre los 17-27,5 °C.

Anexo 7.4 Determinación del caudal de operación

Cálculo del Reynolds en destilación osmótica:

Para calcular el número de Reynolds se ocupa la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{v * d_h * \rho}{\mu}$$

Donde

d_h : Diámetro hidráulico (m)

ρ : Densidad del efluente kg/m³

μ : Viscosidad del efluente (Pa s)

v : Velocidad de circulación de la alimentación (m/s)

Se tiene que

$$v = \frac{Q}{afluanlim * 1000 * 60}$$

Para una membrana de fibra hueca 1.7 x 5.5 MiniModule®; Liqui-Cel; 0.58 m² se obtiene:

$$afluanlim = \pi * \left(\frac{D_c}{2}\right)^2 - \pi \left(\frac{dT}{2}\right)^2 * NF$$

Se detallan los valores correspondientes en la siguiente tabla:

Tabla 7.23. Parámetros geométricos y operacionales utilizados para el cálculo de la velocidad y número de Reynolds en el módulo de fibra hueca.

v [m/s]	Q [L/min]	$afluanlim$ [m ²]	D_c [m]	dT [m]	NF [Adim]
0,034	1,50	0,00073	0,0040	0,00030	7400

Conociendo la velocidad y obteniendo el Reynolds con la densidad y viscosidad conocida del jugo de maracuyá para un diámetro hidráulico de 0,00041327 m se obtiene un Reynolds de un valor aproximadamente 9.

Ahora para el módulo de membrana ocupado para la Ultrafiltración y Nanofiltración se tiene que la velocidad del flujo transversal de un módulo de membrana enrollada en espiral está dada por la siguiente ecuación:

$$v = \frac{Q}{\emptyset * A_t}$$

Donde

\emptyset : Porosidad

Q : Caudal [$\frac{m^3}{s}$]

De tesis de Carrasco ,A. [13] se tiene que $A_t = 0,000094 m^2$ y $\emptyset = 0,8691$

Observando que la bomba puede llegar a un caudal de máximo de 400 L/h se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 7.24. Cálculo de la velocidad y número de Reynolds en función del caudal volumétrico.

Q [L/h]	Q [m ³ /s]	v [m/s]	Re
100	0,000027778	0,34	192
200	0,000055556	0,68	384
300	0,000083333	1,02	576
400	0,000111111	1,36	768

Al analizar la tabla, se observa que la opción más adecuada es trabajar con un caudal de 100 L/h, ya que este valor de Reynolds es el más cercano a los utilizados previamente en el proceso de destilación osmótica.

Anexo 7.5 Medición de la vitamina C

Se hizo la curva de calibración con ácido ascórbico dos veces para poder determinar el error.

Se obtienen los siguientes resultados:

Toma 1

Tabla 7.25. Resultados de absorbancia para soluciones estándar de ácido ascórbico en la toma 1.

Muestra	Concentración [g/L]	Ácido ascórbico [ml]	Agua destilada [ml]	Absorbancia
1	0,001	0,001	4,999	0,039
2	0,004	0,004	4,996	0,064
3	0,006	0,006	4,994	0,095
4	0,008	0,008	4,992	0,15
5	0,03	0,03	4,97	0,376
6	0,035	0,035	4,965	0,424
7	0,04	0,04	4,96	0,476
8	0,045	0,045	4,955	0,544

Se obtiene la siguiente curva de calibración:

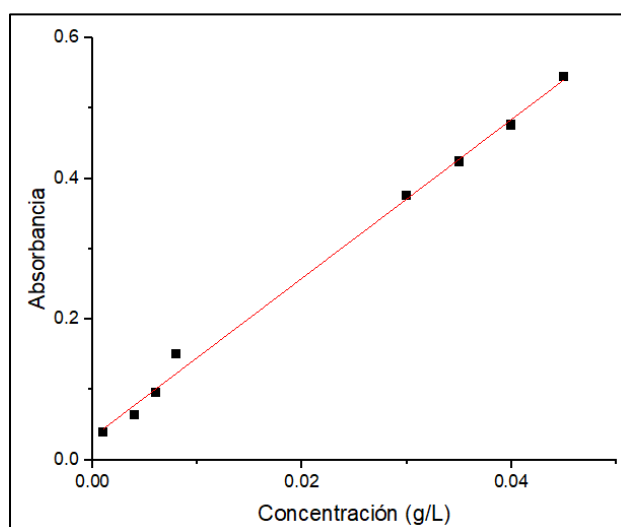


Figura 7.2. Curva de calibración de ácido ascórbico correspondiente a la Toma 1: relación entre concentración y absorbancia.

Esta curva presenta la siguiente ecuación:

$$A = 11,279C + 0,0327$$

Toma 2:

Tabla 7.26. Resultados de absorbancia para soluciones estándar de ácido ascórbico en la toma 1.

Muestra	Concentración [g/L]	Ácido ascórbico [ml]	Agua destilada [ml]	Absorbancia
1	0,001	0,001	4,999	0,046
2	0,004	0,004	4,996	0,079
3	0,006	0,006	4,994	0,112
4	0,008	0,008	4,992	0,156
5	0,03	0,03	4,97	0,367
6	0,035	0,035	4,965	0,422
7	0,04	0,04	4,96	0,471
8	0,045	0,045	4,955	0,515

Se obtiene la siguiente curva de calibración:

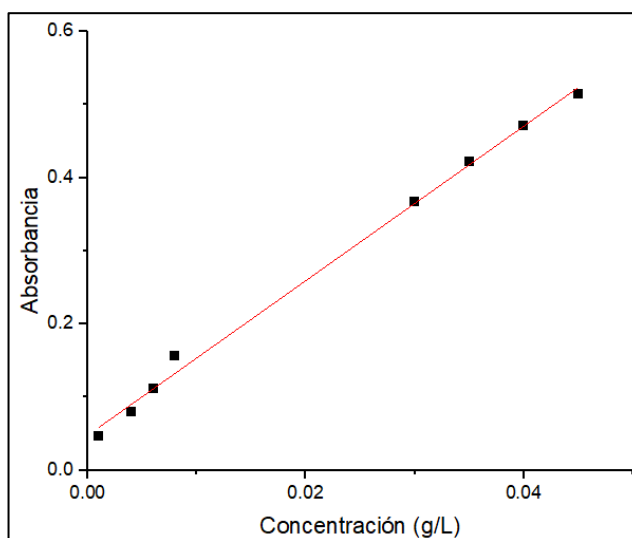


Figura 7.3. Curva de calibración de ácido ascórbico correspondiente a la Toma 2: relación entre concentración y absorbancia.

Esta curva presenta la siguiente ecuación:

$$A = 10,57C + 0.0477$$

Anexo 7.6 Determinación de los polifenoles totales

Se realizó dilución seriada a partir del estándar de ácido gálico a partir de una concentración de 0.001 g/ml

Se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 7.27. Resultados de absorbancia para soluciones estándar de ácido gálico en la curva de calibración.

Tubo N°	Volumen Ác. Gálico (μL)	Metanol 80% (μL)	Volumen final (μL)	[Ác. Gálico] (g/mL)	Absorbancia
1	750	750	1500	3,13E-05	1,510
2	750	750	1500	1,56E-05	0,849
3	750	750	1500	7,81E-06	0,422
4	750	750	1500	3,91E-06	0,264
5	750	750	1500	1,95E-06	0,118
6	750	750	1500	9,77E-07	0,036

Se obtiene la siguiente curva de calibración:

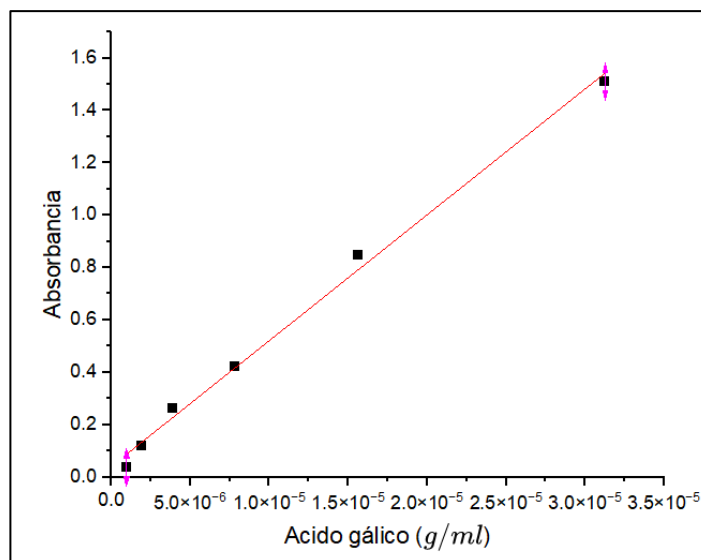


Figura 7.4. Curva de calibración de ácido gálico: absorbancia en función de la concentración.

Esta curva presenta la siguiente ecuación:

$$A = 48061C + 0,0404$$

Anexo 7.7 Equipo experimental

El equipo utilizado para los ensayos fue un sistema de filtración por flujo cruzado modelo SEPA CF Cell, fabricado por Sterlitech Corporation. Este sistema permite evaluar membranas planas en condiciones de laboratorio, simulando el comportamiento de equipos industriales. Está construido en acero inoxidable y soporta presiones de hasta 69 bar y

temperaturas de hasta 177 °C. Cuenta con una superficie de filtración de 140 cm² y un volumen muerto de 70 mL. Su diseño modular permite trabajar con distintos tipos de membranas en procesos como Ultrafiltración, Nanofiltración y ósmosis inversa.

Se detalla a continuación los equipos, reactivos y materiales utilizados para realizar esta investigación:

Tabla 7.28. Equipos e instrumentos utilizados en el proceso

Aparato	Especificación
Módulo de filtración	SEPA CF Cell
Balanza	300 ± 0,001g; Denver Instrument Company AA-200
Cronómetro	Cronómetro de celular portátil
Baño ultrasónico	Elma S 60H
Membrana de Ultra y Nanofiltración	100 kDa, 200 Da
Termómetro digital	CHY 802W
Refractómetro	HI 96801
Conductímetro	HQ40d
Centrifugadora	
Densímetro	Density meter DMA 4500 M
Goniómetro	Kruss dsA25

Tabla 7.29. Materiales de laboratorio empleados

Materiales	Especificación
Matraces aforados	100, 250, 1000 y 2000 ml
Pipeta	1,10 ml
Pizeta	500 ml
Probeta	250 ml ,500,1000 y 2000 ml
Espatula	-
Vaso de precipitado	250,500,1000

Tabla 7.30. Sustancias y reactivos utilizados en los ensayos

Sustancias y reactivos
Agua destilada
Jugo de maracuyá
Etanol
NaOH
EDTA
Ácido gálico
NaF
Reactivo Foling-Ciocalteu
Ácido ascórbico

Anexo 7.8 Permeabilidad durante la recuperación de la membrana de Ultrafiltración

Membrana 1:

Tabla 7.31. Permeabilidad de la membrana 1 de Ultrafiltración según el tipo de tratamiento aplicado, en el primer y segundo uso.

Tratamiento de la membrana de Ultrafiltración	Permeabilidad $\frac{L}{m^2 \text{ bar h}}$	
	Primer uso (Determinación Presión operación)	Segundo uso (Concentración)
Membrana limpia	25,22	21,03
Membrana después del lavado con agua post saturación	8,56	6,24
Membrana después del lavado básico	11,92	8,97
Membrana después del reposo en etanol	21,03	15,59

Membrana 2:

Tabla 7.32. Permeabilidad de la membrana 2 de Ultrafiltración según el tipo de tratamiento aplicado, en el primer y segundo uso.

Tratamiento de la membrana de Ultrafiltración	Permeabilidad $\frac{L}{m^2 \text{ bar h}}$	
	Primer uso (Determinación Presión operación)	Segundo uso (Concentración)
Membrana limpia	19,22	13,61
Membrana después del lavado con agua post saturación	6,11	10,93
Membrana después del lavado básico	7,89	8,69
Membrana después del reposo en etanol	13,61	6,10

Anexo 7.9 Mediciones de las propiedades del jugo de maracuyá antes y después de concentrar

Turbidez:

Tabla 7.33. Turbidez antes y después de la Ultrafiltración con diferentes membranas.

NTU	AA Ultra con membrana 1	AB Ultra con membrana 1	BA Ultra con membrana 2	BB Ultra con membrana 2
Antes de Concentrar	82	82	82	82
Permeado	8,22	24,83	10,86	33,74
Retenido	101	39	94	79

Tabla 7.34. Turbidez antes y después de la Nanofiltración con diferentes membranas.

NTU	CC Nano con membrana 2	DD Nano con membrana 3	EE Nano con membrana 4
Antes de Concentrar	8,77	8,77	81
Permeado	1,15	0,15	3,58
Retenido	9,66	15,61	100

pH:

Tabla 7.35. PH antes y después de la Ultrafiltración con diferentes membranas.

pH	AA Ultra con membrana 1	AB Ultra con membrana 1	BA Ultra con membrana 2	BB Ultra con membrana 2
Antes de Concentrar	2,83	2,83	2,83	2,83
Permeado	2,84	2,85	2,83	2,83
Concentrado	2,83	2,81	2,84	2,82

Tabla 7.36. pH antes y después de la Nanofiltración con diferentes membranas.

pH	CC	DD	EE
	Nano con membrana 2	Nano con membrana 3	Ultra con membrana 4
Antes de Concentrar	2,83	2,83	2,9
Permeado	4,18	3,54	3,94
Concentrado	2,93	2,92	2,91

Conductividad:

Tabla 7.37. Conductividad antes y después de la Ultrafiltración con diferentes membranas

Conductividad mS/cm	AA	AB	BA	BB
	Ultra con membrana 1	Ultra con membrana 1	Ultra con membrana 2	Ultra con membrana 2
Antes de Concentrar	4,6	4,6	4,6	4,6
Permeado	3,95	3,49	3,98	3,79
Concentrado	3,82	3,37	3,82	3,72

Tabla 7.38. Conductividad antes y después de la Nanofiltración con diferentes membranas

Conductividad	CC	DD	EE
	Nano con membrana 2	Nano con membrana 3	Nano con membrana 4
Antes de Concentrar	3,95 mS/cm	3,95 mS/cm	4,46 mS/cm
Permeado	106,4 uS/cm	309 uS/cm	170,9 uS/cm
Concentrado	3,53 mS/cm	3,70 mS/cm	4,84 mS/cm

Vitamina C

Tabla 7.39. Concentración de vitamina C antes y después de la Ultrafiltración con diferentes membranas

Vitamina C g/L	AA Ultra con membrana 1	AB Ultra con membrana 1	BA Ultra con membrana 2	BB Ultra con membrana 2
Antes de Concentrar	2,92	2,92	2,92	2,92
Permeado	0,67	0,46	0,67	1,14
Concentrado	1,55	1,01	1,35	1,44

Tabla 7.40. Concentración de vitamina C antes y después de la Nanofiltración con diferentes membranas

Vitamina C g/L	CC Nano con membrana 2	DD Nano con membrana 3	EE Ultra con membrana 4
Antes de Concentrar	0,68	0,68	0,76
Permeado	0,22	0,16	0,01
Concentrado	0,99	1,04	1,93

Grados Brix

Tabla 7.41. Grados Brix antes y después de la Ultrafiltración con diferentes membranas

Grados Brix	AA Ultra con membrana 1	AB Ultra con membrana 1	BA Ultra con membrana 2	BB Ultra con membrana 2
Antes de Concentrar	12	11	11	10,5
Permeado	7,3	4,9	6,3	3
Concentrado	11,5	6,4	9,2	8,4

Tabla 7.42. Grados Brix antes y después de la Nanofiltración con diferentes membranas

Grados Brix	CC Nano con membrana 2	DD Nano con membrana 3	EE Ultra con membrana 4
Antes de Concentrar	11	11	12,1
Permeado	0,2	0,2	0,2
Concentrado	6,6	6,9	14,6

Polifenoles:

Tabla 7.43. Polifenoles totales antes y después de la Ultrafiltración con diferentes membranas

Polifenoles g/ml	AA Ultra con membrana 1	AB Ultra con membrana 1	BA Ultra con membrana 2	BB Ultra con membrana 2
Antes de Concentrar	6,72E-05	6,72E-05	6,72E-05	6,72E-05
Permeado	2,42E-05	2,53E-05	4,17E-05	2,54E-05
Concentrado	2,65E-05	2,63E-05	2,73E-05	2,71E-05

Tabla 7.44. Polifenoles totales antes y después de la Nanofiltración con diferentes membranas

Polifenoles g/ml	CC Nano con membrana 2	DD Nano con membrana 3	EE Ultra con membrana 4
Antes de Concentrar	2,42E-05	2,42E-05	7,10E-05
Permeado	1,16E-05	3,13E-06	3,29E-06
Concentrado	2,49E-05	2,34E-05	2,76E-05

Anexo 7.10 Modo de operación de Ultrafiltración y Nanofiltración

El equipo se operó en configuración de filtración tangencial (crossflow) utilizando la celda SEPA CF, con la membrana cortada de un módulo enrollado y posicionada sobre el soporte poroso. La alimentación ingresó por un extremo superior, circulando paralela a la superficie de la membrana, mientras el permeado atravesó la membrana hacia la cámara inferior y el concentrado salió por el extremo opuesto. Tanto en Ultrafiltración como en Nanofiltración la configuración fue modo concentración por lotes hasta concentrar a un VRF=4.

El cálculo del Volumen de Reducción de Flujo (VRF) se realizó de acuerdo con la siguiente ecuación

$$VRF = \frac{V_{Alimentación\ inicial}}{V_{Retenido\ final}}$$

Se muestra en la Figura 7.5 un esquema del proceso experimental



Figura 7.5. Montaje experimental del sistema de filtración tangencial con celda SEPA