



MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE LA EVAPORACIÓN OSMÓTICA PARA LA CONCENTRACIÓN DE JUGO DE NONI (*MORINDA CITRIFOLIA*)

Expositora : Mg. Natacha Valderrama Miranda
Coautores : Dr. Julio Romero Figueroa
Mg. Hugo Valdés Riquelme
Dr. Aldo Saavedra Fenoglio

TEMARIO



- Objetivos
- Noni (*Morinda citrifolia*)
- Evaporación osmótica
- Modelación fenomenológica
- Resultados y discusiones
- Conclusiones

OBJETIVOS



Objetivo general

Modelar y simular la evaporación osmótica para concentrar jugo de noni (*Morinda citrifolia*) en un contenedor de membrana de fibras huecas.

Objetivos específicos

1. Desarrollar un modelo de resistencias en serie para caracterizar la evaporación osmótica en un contenedor de membrana de fibras huecas.
2. Analizar el proceso de transferencia de masa y el proceso de transferencia simultánea de masa y calor en la evaporación osmótica mediante la simulación de un modelo de resistencias en serie, donde la fase de la alimentación es agua y la fase extractante es una solución acuosa de cloruro de calcio.
3. Estudiar el proceso de transferencia de masa en la evaporación osmótica mediante la simulación de un modelo de resistencias en serie, donde la fase de la alimentación es una solución modelo de jugo de noni y la fase extractante es una solución acuosa de cloruro de calcio.
4. Identificar las etapas controlantes de la evaporación osmótica en un contenedor de membrana de fibras huecas.

NONI (*MORINDA CITRIFOLIA*)



Regiones de cultivo del noni (*Morinda citrifolia*)



NONI (*MORINDA CITRIFOLIA*)



Perfil composicional del Tahitian Noni® juice

Característica	Contenido	Unidad
Humedad	89-90	g/100 g
Proteínas	0.2-0.5	g/100 g
Cenizas	0.2-0.3	g/100 g
Grasa	0.1-0.2	g/100 g
Hidratos de carbono	9.0-11.0	g/100 g
Fibra dietética	0.5-1.0	g/100 g
Fructosa	3.0-4.0	g/100 g
Glucosa	3.0-4.0	g/100 g
Sacarosa	<0.1	g/100 g
Energía	163-197	kJ/100 g
Gravedad específica	1.015	g/ml
pH	3.4-3.6	Adimensional



Fuente: European Commission, Scientific Committee on Food, Opinion of the Scientific Committee on Food on Tahitian Noni® juice, SCF/CS/NF/DOS/18 ADD 2, Belgium (2002).

EVAPORACIÓN OSMÓTICA

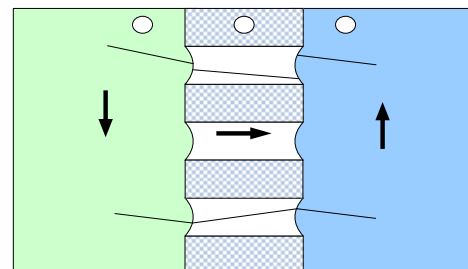


Diagrama de la evaporación osmótica

EVAPORACIÓN OSMÓTICA


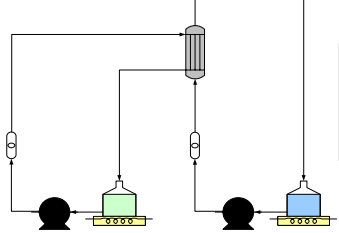



Diagrama de flujo del trabajo experimental



Variables de operación

Variable	Nivel bajo	Nivel medio	Nivel alto
C_s (mol·kg ⁻¹)	2.00	4.00	6.00
Q_a (L·min ⁻¹)	0.10	0.55	1.00
Q_p (L·min ⁻¹)	0.10	0.55	1.00

EVAPORACIÓN OSMÓTICA




Característica	Valor
Material de la membrana	Polipropileno
Porosidad (%)	40
Diámetro de un poro (m)	2.00·10 ⁻⁷
Número de fibras	7400
Diámetro interno de una fibra (m)	2.20·10 ⁻⁴
Diámetro externo de una fibra (m)	3.00·10 ⁻⁴
Longitud de una fibra (m)	1.21·10 ⁻¹
Diámetro interno de la carcasa (m)	4.00·10 ⁻²

1.7x5.5 MiniModule® Liqui-Cel®



EVAPORACIÓN OSMÓTICA



Transferencia de masa en la capa límite de la alimentación


Correlación tipo Sherwood $Sh = a_1(a_2 - \phi) Re^{(a_3 - a_4 \phi)} Sc^{a_5}$

Flujo de agua $N_{A1} = k_{x,1}(X_{a,b} - X_{a,i})a_e$

Resistencia a la transferencia de masa $Rm_1 = \frac{Y_1 X_{ml,1}}{k_1 \rho_1}$

- 1: Minimódulo de fibras huecas
- 2: Rotámetro
- 3: Bomba peristáltica

EVAPORACIÓN OSMÓTICA



Transferencia de masa en la capa hidrofóbica con difusión Knudsen


Permeabilidad del vapor de agua $G_{KN} = \frac{2 \epsilon r_p}{3 \tau \delta} \left(\frac{8}{\pi R T M_A} \right)^{1/2}$

Flujo de vapor de agua $N_{A2} = G_{KN}(a_{w1} P_{A1}^o - a_{w2} P_{A2}^o) \left(\frac{a_e + a_i}{2} \right)$

Resistencia a la transferencia de masa $Rm_2 = \frac{1}{P_{A1}^o \frac{2 \epsilon r_p}{3 \tau \delta} \left(\frac{8 M_A}{\pi R T} \right)^{1/2}}$

- 4: Baño termostatzado
- 5: Solución de la alimentación
- 6: Solución de la salmuera

EVAPORACIÓN OSMÓTICA




Transferencia de masa en la capa hidrofóbica con difusión molecular

Permeabilidad del vapor de agua $G_{MD} = \frac{P}{RT} \frac{\epsilon D_{AB}}{\tau \delta} \left(\frac{1}{a_{w1} P_{A1}^o - a_{w2} P_{A2}^o} \right) \ln \left(\frac{P - a_{w2} P_{A2}^o}{P - a_{w1} P_{A1}^o} \right)$

Flujo de vapor de agua $N_{A2} = G_{MD}(a_{w1} P_{A1}^o - a_{w2} P_{A2}^o) \left(\frac{a_e + a_i}{2} \right)$

Resistencia a la transferencia de masa $Rm_2 = \frac{(a_{w1} P_{A1}^o - a_{w2} P_{A2}^o)}{P_{A1}^o M_A \frac{P}{RT} \frac{\epsilon D_{AB}}{\tau \delta} \ln \left(\frac{P - a_{w2} P_{A2}^o}{P - a_{w1} P_{A1}^o} \right)}$

EVAPORACIÓN OSMÓTICA



Transferencia de masa en la capa límite de la salmuera

Correlación tipo Sherwood $Sh = b_1(Gz)^{b_2}$

Flujo de agua $N_{A3} = k_{x,3}(X_{s,i} - X_{s,b})a_i$

Resistencia a la transferencia de masa $Rm_3 = \frac{Y_3 X_{ml,3}}{k_3 \rho_3}$

EVAPORACIÓN OSMÓTICA



Transferencia de calor en la capa límite de la alimentación

Correlación tipo Nusselt $Nu = c_1 (Re)^{c_2} (Pr)^{c_3}$

Flujo de calor $Q_1 = h_1 (T_{a,b} - T_{a,i}) a_e$

Resistencia a la transferencia de calor $Rh_1 = \frac{1}{h_1 a_e}$

EVAPORACIÓN OSMÓTICA



Transferencia de calor en la capa hidrofóbica

Coefficiente de transferencia de calor $h_2 = \frac{\epsilon K_{\text{aire}}^T + (1 - \epsilon) K_{\text{pp}}^T}{\delta}$

Flujo de calor $Q_2 = N_{A2} \Delta H - h_2 (T_{s,i} - T_{a,i}) \left(\frac{a_e + a_i}{2} \right)$

Resistencia a la transferencia de calor $Rh_2 = \frac{1}{h_2 \left(\frac{a_e + a_i}{2} \right)}$

EVAPORACIÓN OSMÓTICA



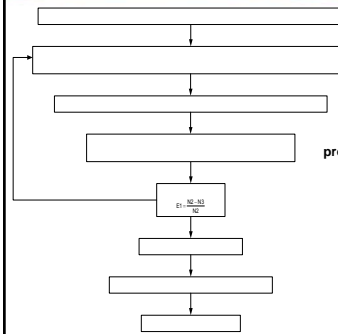
Transferencia de calor en la capa límite de la salmuera

Correlación tipo Nusselt $Nu = d_1 + \frac{d_2 (d_i/L) Re Pr}{d_3 + d_4 ((d_i/L) Re Pr)^{d_5}}$

Flujo de calor $Q_3 = h_3 (T_{s,i} - T_{s,b}) a_i$

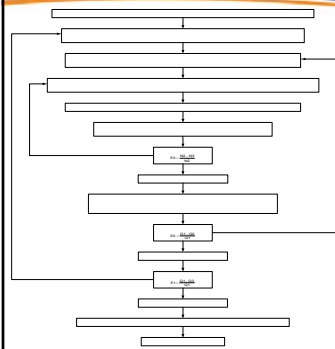
Resistencia a la transferencia de calor $Rh_3 = \frac{1}{h_3 a_i}$

MODELACIÓN FENOMENOLÓGICA



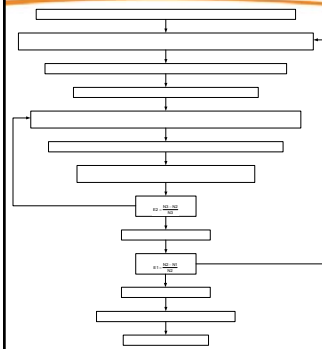
Algoritmo del modelo de resistencias en serie para el proceso de transferencia de masa en el sistema agua-salmuera.

MODELACIÓN FENOMENOLÓGICA



Algoritmo del modelo de resistencias en serie para el proceso de transferencia simultánea de masa y calor en el sistema agua-salmuera.

MODELACIÓN FENOMENOLÓGICA



Algoritmo del modelo de resistencias en serie para el proceso de transferencia de masa en el sistema jugo de noni-salmuera.

RESULTADOS Y DISCUSIONES



Error del flujo de la simulación con respecto al flujo experimental

$$\text{Error (\%)} = \left| \frac{N_{\text{Experimental}} - N_{\text{Simulación}}}{N_{\text{Experimental}}} \right| * 100$$

RESULTADOS Y DISCUSIONES



Correlaciones seleccionadas para determinar los coeficientes de transferencia de masa y los coeficientes de transferencia de calor.

Objetivo	Correlación	Condición	Referencia
Coefficiente de transferencia de masa en la capa límite de la salmuera	$Sh = 0.09Gz^P$	$Re < 13$	Propuesta en este trabajo
Coefficiente de transferencia de calor en la capa límite de la alimentación	$Nu = 0.36Re^{1/2}Pr^P$	Soluciones acuosas	Kern (1995)
Coefficiente de transferencia de calor en la capa límite de la salmuera	$Nu = 3.66 + \frac{0.0668(d_p)RePr}{1 + 0.04(d_p)RePr^P}$	Re laminar	Holman (1998)
Coefficiente de transferencia de masa en la capa límite de la alimentación	$Sh = 0.09(1 - \phi)Re^{0.8 + 1.9\phi}Sc^{0.533}$	$Re < 10$ $0.35 < \phi < 0.79$	Thanedgunbaworn et al. (2007)

RESULTADOS Y DISCUSIONES



Tabla comparativa entre los datos experimentales y los resultados de la simulación del proceso de transferencia de masa en el sistema agua-salmuera.

Número de la corrida	Datos experimentales				Resultados de la simulación			
	C_s (mol·kg ⁻¹)	Q_2 (L·min ⁻¹)	Q_1 (L·min ⁻¹)	$N \cdot 10^3$ (mol·s ⁻¹)	Difusión Knudsen		Difusión Molecular	
					$N \cdot 10^3$ (mol·s ⁻¹)	Error (%)	$N \cdot 10^3$ (mol·s ⁻¹)	Error (%)
1	2.00	0.10	0.10	1.07	0.74	31.19	0.70	34.12
2	6.00	0.10	0.10	3.02	2.11	30.34	2.02	33.11
3	2.00	1.00	0.10	1.06	0.74	30.34	0.70	33.31
4	6.00	1.00	0.10	3.30	2.11	36.22	2.02	38.76
5	2.00	0.10	1.00	1.10	1.52	37.71	1.39	26.69
6	6.00	0.10	1.00	3.21	4.35	35.82	4.04	26.01
7	2.00	1.00	1.00	1.18	1.52	28.60	1.39	18.31
8	6.00	1.00	1.00	3.49	4.35	24.66	4.04	15.65
9	4.00	0.55	0.55	2.27	2.51	10.23	2.35	3.32
10	4.00	0.55	0.55	2.24	2.51	12.09	2.35	5.07
11	4.00	0.55	0.55	2.34	2.51	6.93	2.35	0.24

RESULTADOS Y DISCUSIONES



Tabla comparativa entre los datos experimentales y los resultados de la simulación del proceso de transferencia simultánea de masa y calor en el sistema agua-salmuera.

Número de la corrida	Datos experimentales				Resultados de la simulación			
	C_s (mol·kg ⁻¹)	Q_2 (L·min ⁻¹)	Q_1 (L·min ⁻¹)	$N \cdot 10^3$ (mol·s ⁻¹)	Difusión Knudsen		Difusión Molecular	
					$N \cdot 10^3$ (mol·s ⁻¹)	Error (%)	$N \cdot 10^3$ (mol·s ⁻¹)	Error (%)
1	2.00	0.10	0.10	1.07	0.74	31.19	0.70	34.12
2	6.00	0.10	0.10	3.02	2.11	30.34	2.02	33.11
3	2.00	1.00	0.10	1.06	0.74	30.34	0.70	33.31
4	6.00	1.00	0.10	3.30	2.11	36.22	2.02	38.76
5	2.00	0.10	1.00	1.10	1.52	37.72	1.39	26.69
6	6.00	0.10	1.00	3.21	4.35	35.83	4.04	26.01
7	2.00	1.00	1.00	1.18	1.52	28.61	1.39	18.31
8	6.00	1.00	1.00	3.49	4.35	24.67	4.04	15.66
9	4.00	0.55	0.55	2.27	2.51	10.23	2.35	3.33
10	4.00	0.55	0.55	2.24	2.51	12.10	2.35	5.08
11	4.00	0.55	0.55	2.34	2.51	6.94	2.35	0.24

RESULTADOS Y DISCUSIONES



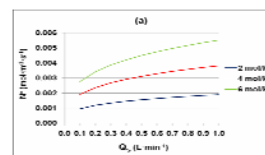
Tabla comparativa entre los datos experimentales y los resultados de la simulación del proceso de transferencia de masa en el sistema jugo de noni-salmuera.

Número de la corrida	Datos experimentales				Resultados de la simulación			
	C_s (mol·kg ⁻¹)	Q_2 (L·min ⁻¹)	Q_1 (L·min ⁻¹)	$N \cdot 10^3$ (mol·s ⁻¹)	Difusión Knudsen		Difusión Molecular	
					$N \cdot 10^3$ (mol·s ⁻¹)	Error (%)	$N \cdot 10^3$ (mol·s ⁻¹)	Error (%)
1	2.00	0.10	0.10	0.52	0.52	0.79	0.51	1.41
2	6.00	0.10	0.10	2.48	0.91	63.24	0.91	63.26
3	2.00	1.00	0.10	0.63	0.67	6.83	0.65	2.79
4	6.00	1.00	0.10	3.00	1.97	34.36	1.90	36.56
5	2.00	0.10	1.00	0.61	0.73	19.10	0.71	17.00
6	6.00	0.10	1.00	2.54	0.90	64.44	0.90	64.42
7	2.00	1.00	1.00	0.74	1.32	78.90	1.23	67.06
8	6.00	1.00	1.00	3.35	3.68	10.08	3.51	5.02
9	4.00	0.55	0.55	2.12	2.08	1.92	2.00	5.83
10	4.00	0.55	0.55	2.11	2.08	1.37	2.00	5.29
11	4.00	0.55	0.55	2.28	2.08	8.73	2.00	12.36

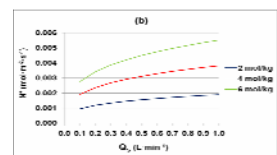
RESULTADOS Y DISCUSIONES



Proceso de transferencia de masa en el sistema agua-salmuera

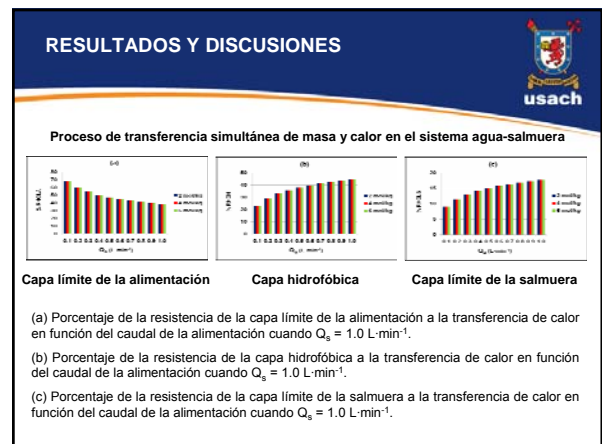
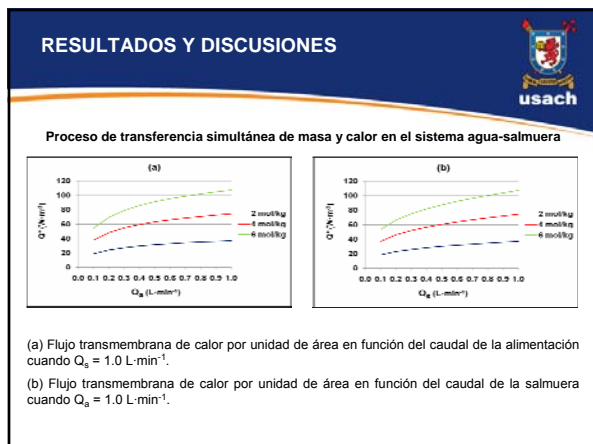
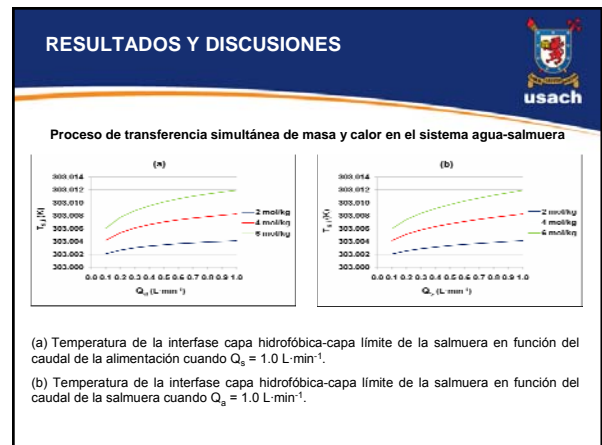
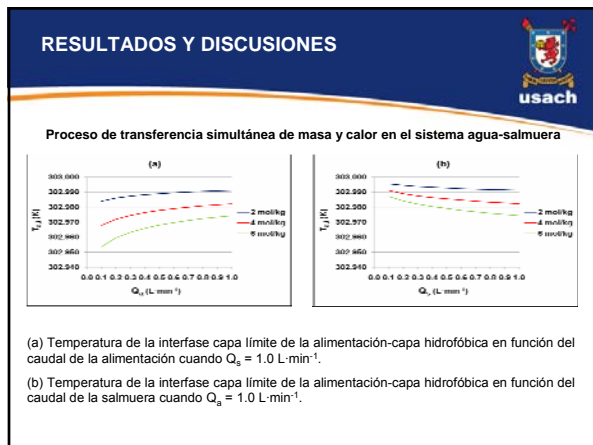
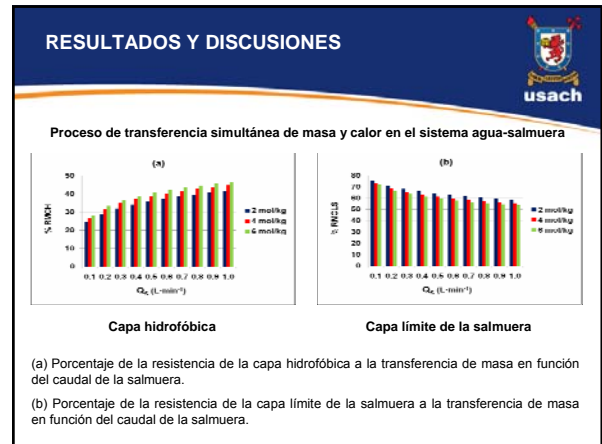
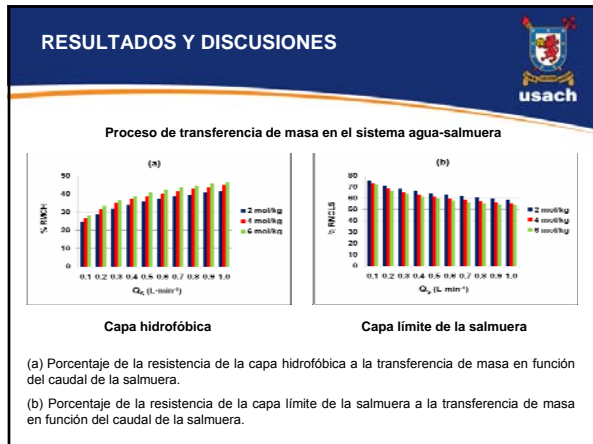


Proceso de transferencia simultánea de masa y calor en el sistema agua-salmuera



(a) Flujo transmembrana de vapor de agua por unidad de área en función del caudal de la salmuera.

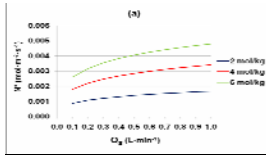
(b) Flujo transmembrana de vapor de agua por unidad de área en función del caudal de la salmuera.



RESULTADOS Y DISCUSIONES



Proceso de transferencia de masa en el sistema jugo de noni-salmuera

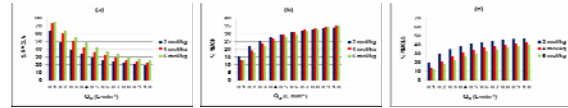


(a) Flujo transmembrana de vapor de agua por unidad de área en función del caudal de la salmuera cuando $Q_s = 1.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

RESULTADOS Y DISCUSIONES



Proceso de transferencia de masa en el sistema jugo de noni-salmuera



Capa límite de la alimentación Capa hidrofóbica Capa límite de la salmuera

(a) Porcentaje de la resistencia de la capa límite de la alimentación a la transferencia de masa en función del caudal de la alimentación cuando $Q_s = 1.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

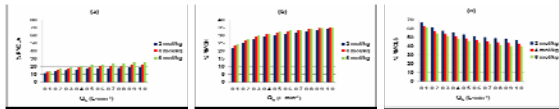
(b) Porcentaje de la resistencia de la capa hidrofóbica a la transferencia de masa en función del caudal de la alimentación cuando $Q_s = 1.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

(c) Porcentaje de la resistencia de la capa límite de la salmuera a la transferencia de masa en función del caudal de la alimentación cuando $Q_s = 1.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

RESULTADOS Y DISCUSIONES



Proceso de transferencia de masa en el sistema jugo de noni-salmuera



Capa límite de la alimentación Capa hidrofóbica Capa límite de la salmuera

(a) Porcentaje de la resistencia de la capa límite de la alimentación a la transferencia de masa en función del caudal de la salmuera cuando $Q_a = 1.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

(b) Porcentaje de la resistencia de la capa hidrofóbica a la transferencia de masa en función del caudal de la salmuera cuando $Q_a = 1.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

(c) Porcentaje de la resistencia de la capa límite de la salmuera a la transferencia de masa en función del caudal de la salmuera cuando $Q_a = 1.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

CONCLUSIONES



1. El mecanismo de transporte a través de los poros de la membrana podría explicarse por un régimen de transición entre la difusión Knudsen y la difusión molecular.
2. Bajo las condiciones de trabajo, el flujo transmembrana de vapor de agua se maximiza en el sistema agua-salmuera y en el sistema jugo de noni-salmuera cuando se opera con los valores más altos de las tres variables en estudio (concentración de la salmuera, caudal de la alimentación y caudal de la salmuera).
3. El mayor potencial para la transferencia de masa se obtiene en el sistema agua-salmuera.
4. Bajo las condiciones de trabajo, el efecto de la polarización térmica incide mínimamente en el transporte de vapor de agua a través de la membrana.
5. El flujo transmembrana de calor se relaciona directamente con el flujo de masa a través de la membrana cuando el fenómeno de la polarización por temperatura es insignificante en la evaporación osmótica.

CONCLUSIONES



6. En el sistema agua-salmuera, el porcentaje de la resistencia de la capa límite de la salmuera a la transferencia de masa es el predominante con un valor promedio de un 62% del total de la resistencia a la transferencia de masa.

7. En el sistema agua-salmuera, el porcentaje de la resistencia de la capa límite de la alimentación a la transferencia de calor es el mayoritario con un valor promedio de un 48% del total de la resistencia a la transferencia de calor.

8. En el sistema jugo de noni-salmuera, el porcentaje de la resistencia de la capa límite de la alimentación a la transferencia de masa es el predominante con un valor promedio de un 38% del total de la resistencia a la transferencia de masa cuando el caudal de la alimentación aumenta de $0.1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ a $1.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.

9. En el sistema jugo de noni-salmuera, el porcentaje de la resistencia de la capa límite de la salmuera a la transferencia de masa es el mayoritario con un valor promedio de un 50% del total de la resistencia a la transferencia de masa cuando el caudal de la salmuera varía de $0.1 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ a $1.0 \text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$.



Laboratorio de Procesos de Separación por Membranas (Labprosem)

julio.romero@usach.cl