

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
UNIDAD DE INVESTIGACION



INFORME FINAL DE INVESTIGACION
“EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE UN MÓDULO
DE ÓSMOSIS DIRECTA PARA LA DESALINIZACIÓN DE AGUAS SALOBRES

JUAN TAUMATURGO MEDINA COLLANA

Periodo de ejecución: Del 01 de enero del 2025 al 31 de diciembre del 2025

Resolución de aprobación 198-2024-CFIQ

Callao, 2025

PERÚ

A rectangular area containing a handwritten signature in blue ink.



INFORMACIÓN BÁSICA

FACULTAD: Ingeniería Química

UNIDAD DE INVESTIGACIÓN: Facultad de Ingeniería Química

TITULO:

“EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE UN MÓDULO DE ÓSMOSIS DIRECTA PARA LA DESALINIZACIÓN DE AGUAS SALOBRES

DOCENTE RESPONSABLE: Dr. Juan Taumaturgo Medina Collana

Categoría: Principal

Dedicación: Exclusiva

Código Orcid: 0000-0002-3625-8308

DNI: 06213328

DOCENTE COLABORADOR: Ninguno

ESTUDIANTE (S) DE APOYO: Ninguno

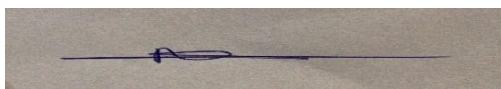
LUGAR DE EJECUCIÓN: Universidad Nacional del Callao

Facultad de Ingeniería Química

UNIDADES DE ANÁLISIS: Aguas salobres subterráneas

TIPO / ENFOQUE / DISEÑO DE INVESTIGACIÓN: Aplicada /Cuantitativo/
experimental.

TEMA OCDE: 2.04.02



DEDICATORIA

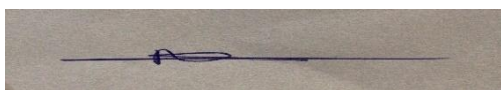
El presente trabajo de investigación lo dedico a mi esposa, por brindarme la fuerza para continuar con mis investigaciones y labor académica. Asimismo, a mis hijos Melissa y Jhoel, por su presencia constante y el apoyo moral que me ofrecen de manera permanente.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional del Callao por el
financiamiento para el desarrollo de la investigación
a través del Fondo Especial de Desarrollo
Universitario (FEDU)

INDICE

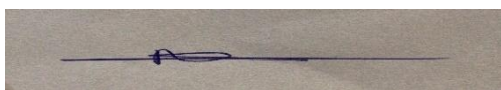
Índice de tablas	3
Índice de figuras	4
RESUMEN	5
ABSTRACT	6
INTRODUCCIÓN	7
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACION	8
1.1. Descripción de la realidad problemática	8
1.2. Formulación del problema	9
1.2.1. Problema General	9
1.2.2. Problemas específicos	9
1.3. Objetivos	9
1.3.1. General	9
1.3.2. Específicos	9
1.4. Justificación	10
1.5. Limitantes	10
1.6. Delimitantes	10
II. MARCO TEORICO	12
2.1. Antecedentes	12
2.1.1. Antecedentes internacionales	12
2.1.2. Antecedentes nacionales	14
2.2. Bases teóricas	15
2.2.1. Osmosis directa	15
2.2.2. Principio de operación	18
2.2.3. Membranas de osmosis directa	19
2.2.4. Pretratamiento del agua de alimentación	20
2.2.5. Indicadores de la evaluación del equipo de osmosis directa	21
2.3. Definición de términos básicos	23
III. HIPOTESIS Y VARIABLES	24
3.1. Formulación de la hipótesis (General y específicas)	24
3.1.1 Operacionalización de variable	24



IV. METODOLOGÍA DEL PROYECTO	27
4.1 Diseño metodológico	27
4.2. Método de investigación	28
4.3. Población y muestra	28
4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado	28
4.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de la información	28
4.5.1 Reactivos químicos	28
4.5.2 Instrumentos	29
4.5.3 Membrana	29
4.5.4 Equipo experimental	30
4.5.5 Diseño experimental	31
4.6 Análisis y procesamiento de datos.	32
4.7 Aspectos Éticos en Investigación	32
V. RESULTADOS	33
5.1. Resultados descriptivos	33
5.2. Resultados inferenciales	38
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	40
6.1. Contrastación y demostración de la hipótesis con los Resultados	40
6.2. Contrastación de los resultados con otros estudios similares	41
6.3. Responsabilidad ética de acuerdo a los reglamentos vigente	42
VI. CONCLUSIONES	43
VII. IMPACTO EN SOCIEDAD	44
VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	45
ANEXOS	48

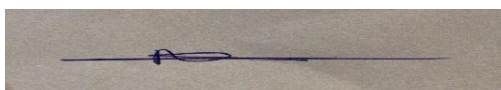
INDICES DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y desventajas de membranas	20
Tabla 2. Operacionalización de las variables independientes	25
Tabla 3. Operacionalización de las variables dependientes	26
Tabla 4. Características de la membrana HFFO2	29
Tabla 5. Factores y niveles del diseño factorial	31
Tabla 6. Matriz de experimentación	31
Tabla 7. Matriz del diseño factorial y respuestas.	33
Tabla 8. Resultados descriptivos	33



ÍNDICE DE FIGURAS

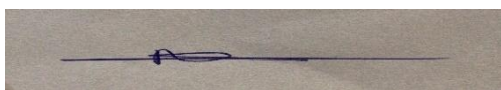
Figura 1. Flujo de disolvente en ósmosis directa y ósmosis inversa	16
Figura 2. Esquema del proceso de desalinización por ósmosis directa	19
Figura 3. Etapas de la investigación	27
Figura 4. Fotografía de la membrana de osmosis directa	30
Figura 5. Configuración de la membrana del equipo experimental	30
Figura 6. Flux de agua vs. tiempo (FS = 3 g/L NaCl; Q = 1000 L/min).	34
Figura 7. Variación del nivel de FS y DS vs. tiempo.	35
Figura 8. Recuperación de agua (%) vs. concentración de DS.	36
Figura 9. Variación de la Conductividad de FS y DS vs. tiempo	37
Figura 10. Efecto de los factores sobre la recuperación de agua (%)	38
Figura 11. Efecto de los factores	39



RESUMEN

La desalinización del agua salobre y salada está siendo una de las soluciones más importantes al problema de la escasez de agua en las zonas afectadas por el estrés hídrico. La ósmosis directa (FO) es un proceso de separación por diferencia de presión osmótica entre una solución de extracción (DS) y una solución de alimentación (FS) de menor concentración. En este estudio se utilizó membrana comercial HFFO2 (Aquaporin Inside) de FO. Se utilizó un diseño factorial completo de tres factores, concentración de la solución de alimentación (1.5 y 3 g/L de NaCl) y concentración de la solución de extracción (15, 25 y 35 g/L de NaCl) y caudal de la solución de alimentación (600 y 1000 mL/min) sobre el porcentaje de recuperación y el flux de agua. Las pruebas demostraron que, a medida que la concentración de la alimentación desciende de 3 a 1.5 g/L de NaCl, la recuperación de agua mejora en 23.6%. Los resultados revelaron que, al aumentar la concentración de la solución de extracción de 15 a 25 g/L de NaCl, se incrementa la recuperación del agua en 22.2 %. Sin embargo, para una variación de concentración de (25 a 35 g/L), este incremento es poco significativo en 0.92%. Los resultados mostraron que, con una concentración de 1.5 g/L de NaCl, un caudal de alimentación de 1000 mL/min y concentración de 25 g/l de NaCl como solución de extracción, se ha logrado una

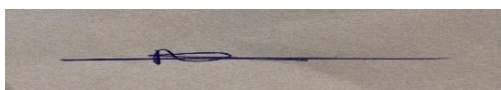
Palabras claves: Ósmosis directa, sistema de desalinización, solución de extracción, proceso de membrana,



ABSTRACT

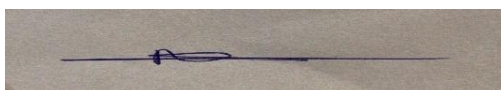
The desalination of brackish and salt water is one of the most important solutions to the problem of water scarcity in areas affected by water stress. Forward osmosis (FO) is a separation process based on the osmotic pressure difference between an extraction solution (DS) and a feed solution (FS) of lower concentration. In this study, a commercial HFFO2 (Aquaporin Inside) FO membrane was used. A complete factorial design of three factors was used: feed solution concentration (1.5 and 3 g/L NaCl), extraction solution concentration (15, 25 and 35 g/L NaCl) and feed solution flow rate (600 and 1000 mL/min) on the percentage of recovery and water flux. The tests showed that as the feed concentration decreases from 3 to 1.5 g/L NaCl, water recovery improves by 23.6%. The results revealed that increasing the concentration of the extraction solution from 15 to 25 g/L NaCl increases water recovery by 22.2%. However, for a concentration variation of (25 to 35 g/L), this increase is insignificant at 0.92%. The results showed that, with a concentration of 1.5 g/L of NaCl, a feed flow rate of 1000 mL/min and a concentration of 25 g/L of NaCl as the extraction solution, a higher water recovery rate (95.4839%) was achieved.

Keywords: Forward osmosis; Desalination system; Draw solution; Membrane process



INTRODUCCIÓN

La desalinización es un proceso crítico para abordar la creciente escasez de agua dulce en diversas regiones del mundo. Con el aumento de la demanda de agua debido al crecimiento poblacional y al cambio climático, las tecnologías de desalinización se han convertido en soluciones viables para proporcionar agua potable a comunidades y sectores agrícolas e industriales. Entre las diversas técnicas de desalinización, la ósmosis directa (OD) ha emergido como una alternativa prometedora. A diferencia de la ósmosis inversa, que requiere presión para forzar el agua a través de una membrana semipermeable, la ósmosis directa utiliza una solución de alimentación que tiene una concentración de solutos más baja que la solución de extracción, permitiendo que el agua se difunda a través de la membrana sin la necesidad de un alto consumo energético. La investigación en ósmosis directa no solo contribuye a la sostenibilidad del suministro de agua, sino que también proporciona una alternativa menos intensiva en energía que puede ser implementada en regiones con recursos hídricos limitados. Con un enfoque en la innovación y la eficiencia, esta tecnología puede desempeñar un papel fundamental en la gestión de recursos hídricos en el futuro. La investigación se llevará a cabo mediante una combinación de estudios experimentales. Se realizarán pruebas en laboratorio para evaluar el rendimiento de la membrana bajo diversas condiciones de operación. La presente investigación tiene el objetivo de determinar las condiciones operativas óptimas del proceso de osmosis directa para facilitar la desalinización del agua salobre. En el capítulo I se ha formulado los problemas de investigación y planteamiento de los objetivos. El segundo capítulo hace referencia a estudios previos de investigación que concuerdan con la propuesta de estudio propuesta y los principios teóricos relacionados con el proceso de desalinización mediante membranas de osmosis directa. En el Capítulo III se formulan las hipótesis de investigación, se seleccionan las variables más representativas —tanto independientes como dependientes y se analiza la relación entre ellas para evidenciar sus efectos. En el Capítulo IV se describe la membrana utilizada en la experimentación, así como el diseño experimental propuesto. Finalmente, en el Capítulo V se presentan y analizan los resultados obtenidos conforme al diseño experimental planteado



I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACION

1.1. Descripción de la realidad problemática.

La escasez de agua dulce es uno de los principales desafíos que enfrentamos actualmente a nivel mundial. Esto se debe principalmente al marcado crecimiento de la población humana y sus actividades industriales y agrícolas [1]. En consecuencia, las iniciativas de investigación contemporáneas en el ámbito de la desalinización y el tratamiento del agua deben abordar rigurosamente este tema crítico para idear soluciones eficaces para la actual crisis mundial del agua. El agua de mar y el agua subterránea salobre son las principales fuentes de agua desalinizada con contribuciones de aproximadamente el 58,9% y el 21,2%, respectivamente, con contribuciones menores de las aguas residuales salinas y el agua superficial [2]. Los principales procesos para la desalinización de agua que se utilizan más a nivel mundial son los procesos impulsados térmicamente por cambio de fase, como la destilación de efecto múltiple (MED), la flash multietapa (MSF) y la compresión de vapor (VC); o los procesos basados en membranas impulsados por presión, como la ósmosis inversa (RO), la ultrafiltración (UF), la nanofiltración (NF) y la electrodiálisis (ED) [3]. La ósmosis directa (FO), introducida por Kessler y Moody en 1976, es una de las tecnologías de membrana prometedoras, sostenibles y energéticamente eficientes para los procesos de separación acuosa [4]. Aunque la FO se introdujo hace más de cuatro décadas, el interés de la investigación en la FO ha aumentado recientemente, con más de 1700 publicaciones en total desde 2006 y los números aumentan año tras año [5]. Las membranas de FO se utilizan en diversas aplicaciones, como la desalinización y la reutilización de aguas residuales [6], los biorreactores de membrana osmótica [7], la generación de energía [5] y el procesamiento de alimentos [8]. La ósmosis directa (FO) es un proceso de separación por membrana que utiliza una solución de extracción altamente concentrada con un alto potencial osmótico para extraer agua a través de una membrana semipermeable desde una fuente de alimentación. El proceso de desalinización FO hace uso de una solución de sal altamente concentrada (conocida como solución de extracción, agente osmótico, medio osmótico o motor osmótico) con bajo potencial químico de agua (alta presión osmótica) para extraer las moléculas de agua de una solución de alimentación (agua salobre o de mar) con



mayor potencial químico de agua (menor presión osmótica) en comparación con la solución de extracción. Durante el proceso de FO, la membrana rechaza las sales y, en consecuencia, la solución de alimentación se concentra y la solución de extracción se diluye con el tiempo.

1.2. Formulación del problema

Efectuar un estudio experimental responderá a las siguientes interrogantes:

1.2.1. Problema General

¿En qué medida influye las condiciones de operación del módulo de osmosis directa sobre la desalinización del agua salobre subterránea?

1.2.2. Problemas específicos

1. ¿Cuál es el efecto de la variación en la concentración de la solución de extracción sobre el porcentaje de recuperación de agua en una solución modelo de agua salobre?
2. ¿Qué efecto tiene la variación de la concentración de alimentación sobre el porcentaje de recuperación flux de agua desde la solución de alimentación hacia la solución de extracción?

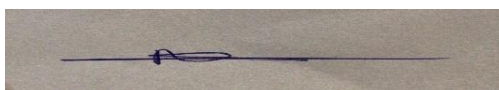
1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Determinar las condiciones operativas mas adecuadas del proceso de ósmosis directa (FO) para facilitar la desalinización del agua salobre.

1.3.2 Objetivos específicos

1. Evaluar el impacto de las alteraciones en la concentración de la solución de extracción sobre el porcentaje de recuperación de agua desde una solución modelo de concentración aproximada de agua salobre.
2. Evaluar qué efecto tiene la variación de la concentración de la solución de alimentación sobre el flux de agua desde la solución de alimentación hacia la solución de extracción.



1.4. Justificación

En varias regiones de nuestro país, el acceso al agua potable está severamente restringido. La desalinización del agua salobre mediante la aplicación de ósmosis directa puede representar una solución factible para abordar la escasez de agua en las áreas afectadas. El interés por la osmosis directa ha aumentado en los últimos años, debido a bajos costos operativos debido fundamentalmente a disminución de consumos de energía con respecto a los sistemas de osmosis inversa. Por otro lado, el avance de las nuevas tecnologías de membranas y ósmosis directa se está produciendo a un ritmo rápido, lo que se traduce en mejoras en la eficiencia de los procesos y hace que su aplicación sea más factible en diversos contextos.

1.5. Limitantes

1.5.1 Teórico

Las limitaciones teóricas son inexistentes; esta investigación se centrará en evaluar las variables de control específicas asociadas a los aparatos de ósmosis directa y su impacto resultante en los niveles de concentración alcanzados tanto en la corriente de alimentación como en el disolvente de extracción.

1.5.2. Espacial

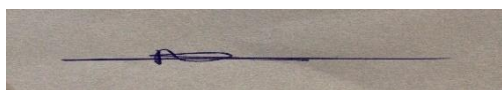
La investigación se limita al empleo de soluciones sintéticas, que se generan en un entorno de laboratorio controlado, utilizando cloruro sólido de grado analítico como medio de extracción junto con agua ultrapura. La solución fuente consistirá en agua salobre obtenida de un pozo situado dentro de la jurisdicción del distrito de Lurín.

1.5.3 Temporal

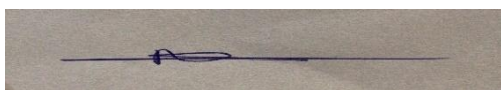
Los datos de campo se recopilarán durante los meses de agosto, setiembre y octubre del año 2025. La duración del esfuerzo de investigación abarcará un año calendario completo, que comenzará el 1 de enero de 2025 y finalizará el 30 de diciembre de 2025.

1.6 Delimitantes

El presente trabajo de investigación se centrará exclusivamente en la utilización de membranas a base de poliamida, atribuible a su excepcional permeabilidad a las



moléculas del agua. Además, se establecerán meticulosamente los parámetros operativos del aparato, que abarcarán el caudal y la concentración de la corriente de alimentación de extracción, así como la cuantificación del caudal de agua. Es imprescindible mantener una presión hidráulica constante en ambos flujos de proceso.



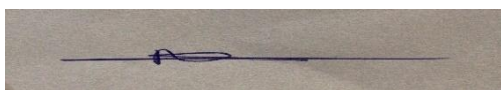
II MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes:

2.1.1. Antecedentes internacionales

En la investigación “Estudio experimental de una membrana de ósmosis frontal enrollada en espiral de triacetato de celulosa para la integración de procesos de desalinización”, cuyo objetivo fue evaluar la viabilidad del proceso de desalinización por ósmosis directa (FO). han utilizado una unidad de ensayo de laboratorio a escala de banco, en modo discontinuo, para extraer agua dulce de la alimentación y diluir simultáneamente la solución de extracción (DS). Una membrana de triacetato de celulosa (CTA), disponible en el mercado, se sometió a pruebas experimentales en diferentes condiciones de funcionamiento. Varios parámetros que afectan a la membrana, a saber, la concentración de alimento, la concentración de soluto de extracción, el caudal y la temperatura, se sometieron a pruebas experimentales. Se investigaron varios parámetros que afectan al flujo de agua y a la tasa de recuperación de agua permeada, a saber, la concentración de alimentación, la concentración de soluto de extracción, el caudal y la temperatura. permeado. Se utilizaron agua desionizada, soluciones de cloruro sódico (NaCl), agua de mar del Golfo y salmuera de ósmosis inversa (RO) como soluciones de alimentación (FS). Se utilizaron diferentes concentraciones de soluciones de NaCl 3.5 a 26 % en peso. Los resultados mostraron que el flujo de agua aumentaba con el incremento de la presión osmótica de la SD. Los resultados experimentales indicaron que el flujo de agua es directamente proporcional a la temperatura de la FS y la DS. Los resultados experimentales fueron muy alentadores y demostraron que la etapa de membrana de FO podría ser un componente eficaz del sistema de desalinización para desalar agua de mar o concentrar aguas muy salinas, incluida la salmuera de osmosis inversa [9].

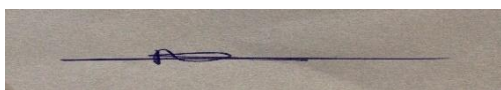
En la investigación cuyo título “Influencia de la temperatura y la diferencia de temperatura en el rendimiento del proceso de desalinización por ósmosis directa “. Mencionan que la ósmosis directa (FO) es una tecnología emergente para la desalinización de bajo consumo energético. Entre muchos factores, la temperatura



de la solución de extracción (DS) y de la solución de alimentación (FS) desempeña un papel importante en el rendimiento del proceso de FO. En el presente estudio, se ha analizado la influencia de la temperatura en el rendimiento del proceso de FO en lo que respecta a los flujos de agua y solutos. Los resultados indican que, por término medio, el flujo de agua aumenta hasta un 1.2% por cada grado de aumento de la temperatura de 25 °C a 35°C, mientras que este aumento es del 2.3% de 25 °C a 45°C. La diferencia de temperatura elevando sólo el DS también mejoró significativamente el flujo de agua, aunque fue menor que en el proceso FO operado en condiciones isotérmicas. Sin embargo, el aumento de la temperatura del FS por sí solo no mejoró significativamente el flujo de agua, aunque fue superior al proceso FO operado a 25 °C [10].

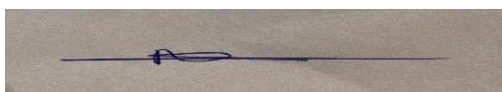
En la investigación titulada “Desalinización por ósmosis directa con sulfato férrico como soluto de arrastre “. Mencionan que falta de solutos de extracción adecuados es uno de los principales factores limitantes que dificultan la realización comercial del proceso de desalinización por osmosis directa (FO) . Este estudio investiga la viabilidad del sulfato férrico como soluto de extracción en la desalinización por FO. Se utilizó un aparato de FO de flujo cruzado a escala de laboratorio que utiliza una membrana de FO comercial (basada en triacetato de celulosa) para desalinizar agua salobre sintetizada (5000 ppm de NaCl) y agua de mar (40 000 ppm de NaCl) utilizando una solución de extracción de sulfato férrico de 280 000 ppm en condiciones ambientales. El flujo de agua promedio observado fue de 3.75 y 1.61L/m² h en el caso del agua salobre y del agua de mar, respectivamente. Utilizando agua desionizada como solución de alimentación, se observó un flujo inverso de sulfato férrico de 1.88 g/m² h. El agua del producto se recuperó de la solución de extracción diluida mediante una reacción de precipitación utilizando hidróxido de bario en 60 y 80 g/L [11].

En el trabajo de investigación titulado “Acetato de celulosa de residuos de racimos de aceite de palma para membranas de ósmosis directa en la desalinización de agua salobre “. Mencionan que la disponibilidad de agua potable se ha convertido en un problema importante en muchas partes del mundo en países emergentes, países en desarrollo y países que a menudo experimentan desastres, incluida Indonesia. La membrana de osmosis directa (FO) es un método alternativo de tratamiento de agua,



particularmente en suministros de agua de emergencia. Este estudio ha desarrollado una membrana de FO para desalinización de agua salobre para producir agua potable. La membrana de FO se fabricó a partir de polímero acetato de celulosa (CA). La membrana de celulosa para FO tiene un valor de flujo de agua de 2.2 L/m²h y un factor de rechazo del 96 % utilizando sacarosa 1 M como solución de extracción. La calidad del agua del producto de FO cumple con los estándares de agua potable según la regulación del Ministerio de Salud de la República de Indonesia y del agua potable de la OMS [12]

En el trabajo de investigación cuyo título es “Concentración de zumo de caña de azúcar mediante una nueva membrana de ósmosis directa de fibra hueca de acuaporina “. Evaluaron el rendimiento de una membrana de acuaporina disponible comercialmente para concentrar el jugo de caña de azúcar. mediante la adopción de una técnica de pretratamiento de UF adecuada. Las influencias de los caudales de la solución de extracción y alimentación, la concentración de la extracción y su dirección de flujo, como co-corriente o contracorriente, en el agua y el flujo de soluto inverso se evaluaron en modo por lotes. Se encontró que el flujo de soluto inverso específico para el modo de contracorriente era menor en comparación con el modo de operación de co-corriente. La mejora del caudal de la solución de extracción (NaCl) aumentó el flujo de agua con una reducción del flujo de soluto inverso específico. La relación de concentración de FS fue de 1.65 dentro de los 12 min de operación de FO por lotes utilizando 100 g L⁻¹ de solución de extracción. El ensuciamiento de la membrana se estudió sistemáticamente con una estrategia de limpieza de membrana adecuada. Se calculó el efecto del jugo de caña de azúcar clarificado y crudo por UF en el ensuciamiento de la membrana de FO y se encontró que el jugo de caña de azúcar crudo provocó un ensuciamiento grave de la membrana que redujo la permeabilidad al agua después de 60 min de operación. La membrana sucia por jugo clarificado UF pudo regenerarse mediante lavado con agua desionizada durante 30 minutos, sin embargo, en el caso de la membrana sucia por jugo crudo, se requirió un lavado adicional con NaOH 0.1 M [8].



2.1.2. Antecedentes nacionales

Las investigaciones desarrolladas a nivel nacional no han recibido el reconocimiento correspondiente en la literatura científica publicada, ni en artículos académicos ni en tesis de pregrado, posgrado o doctorado.

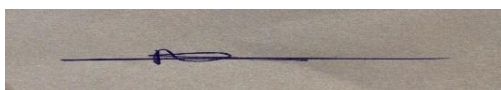
2.2. Bases teóricas

2.2.1. Osmosis directa (FO)

La ósmosis directa es un proceso de filtración natural mediante el cual las moléculas de agua se transfieren espontáneamente a través de los poros de una membrana semipermeable debido a los diferenciales de concentración de solutos[13]. El movimiento de las moléculas de agua se produce en ausencia de cualquier presión hidráulica aplicada externamente; en consecuencia, el agua migra desde la corriente de solución de alimentación (FS), caracterizada por una presión osmótica más baja, hacia la corriente de solución de extracción (DS), que posee una presión osmótica elevada. La concentración de la solución de alimentación aumenta, mientras que, por el contrario, la solución de extracción experimenta una reducción de la concentración [7].

Características

- La osmosis directa utiliza energía natural en forma de presión osmótica para transportar el agua a través de la membrana mientras retiene los solutos disueltos en el otro lado
- En los sistemas de FO, la separación ocurre espontáneamente sin necesidad de aplicar un diferencial de presión hidráulica, como en las membranas de microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración y ósmosis inversa[6]
- La FO tiene varias ventajas que incluyen, una alta tasa de recuperación de agua, menor descarga de salmuera, menor tendencia a la incrustación y bajos requisitos de energía
- La eficacia de la FO para eliminar estos minerales depende de factores como la elección del material de la membrana, las propiedades del DS y las condiciones de operación (por ejemplo, temperatura y presión).
- La viscosidad del fluido es inversamente proporcional al coeficiente de difusión del soluto en DS, por lo tanto, el DS de baja viscosidad tendría un



coeficiente de difusión más alto y una concentración de polarización interna menos severa[6]

- El DS debe tener alta presión osmótica, pH casi neutro, no tóxico, inerte y fácil de regenerar (no volátil) [5].
- Muchos factores pueden influir en el rendimiento de las membranas en la desalinización de FO, incluida la aplicación particular, la fuente de energía, las propiedades del DS y las condiciones de operación[14]

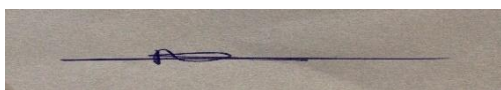
La relación entre las presiones osmótica e hidráulica y el flujo de agua (J_w) puede describirse mediante la Ecuación 1 [15]

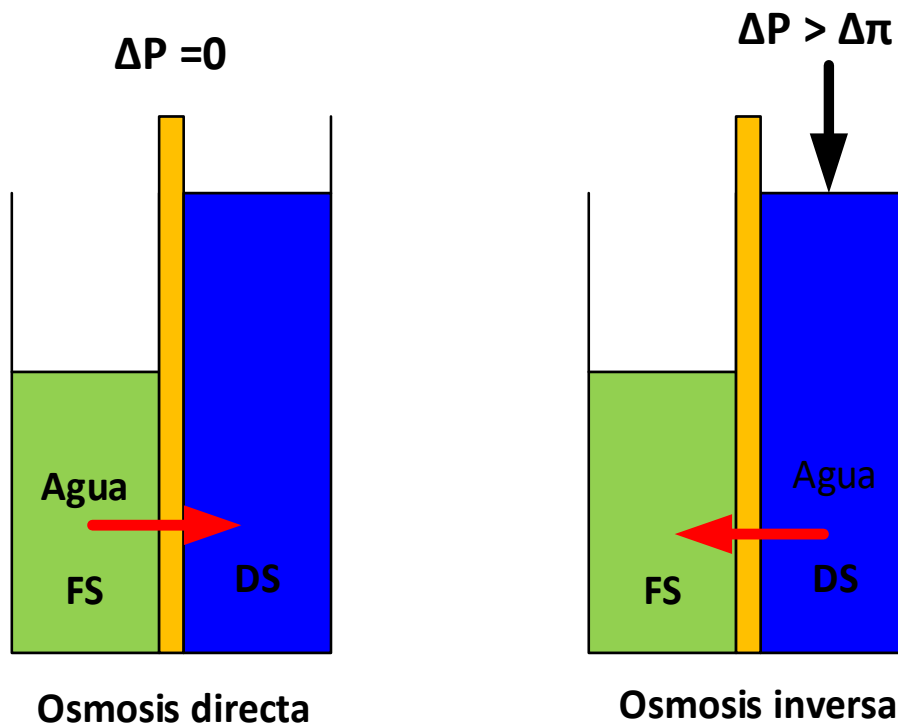
$$J_w = A(\Delta\pi - \Delta P) \quad (1)$$

Dónde A es la constante de permeabilidad al agua de la membrana ($L/m^2 \cdot h \cdot atm.$), $\Delta\pi$ es la diferencia de presión osmótica ($atm.$) entre el lado de la solución de extracción y el lado de alimentación, y ΔP es la diferencia de presión hidráulica ($atm.$) aplicada a través de la membrana. En la figura 1 se muestra el flujo de agua en la membrana de osmosis directa, donde ΔP es cero, mientras que para la RO, tiene un valor muy elevado, en función de la salinidad del FS.

Figura 1

Flujo de disolvente en ósmosis directa y ósmosis inversa.





Dado que el proceso de FO carece de presión hidráulica o ésta es muy baja, ΔP es cero y la relación para el flujo de agua se reduce a:

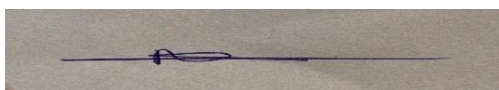
$$J_w = A(\Delta\pi) = A(\pi_{DS} - \pi_{FS}) \quad (2)$$

Donde π_{DS}, π_{FS} representa la presión osmótica de las corrientes de solución de extracción y alimentación, respectivamente.

Presión osmótica

La base para la separación mediante FO es la diferencia de presión osmótica entre dos soluciones diferentes separadas por una membrana semipermeable que permite el paso libre del disolvente, pero restringe el flujo de solutos[16]. Para soluciones muy diluidas, la presión osmótica de una solución simple que contiene un soluto no electrolítico se describe mediante la ecuación de Vant Hoff, que es análoga a la ecuación de los gases ideales (ecuación 3).

$$\pi = \frac{nRT}{V} = MRT \quad (3)$$



donde π es la presión osmótica, V es el volumen de la solución (suponiendo que la solución está lo suficientemente diluida como para que el volumen del soluto y la solución sean esencialmente idénticos), M es la concentración molar (mol L^{-1}), R_g es la constante universal de los gases ideales ($8,314 \text{ J K}^{-1} \text{ mol}^{-1}$), y T es la temperatura absoluta en Kelvin.

Para una solución débil que contiene un electrolito fuertemente disociado, se obtiene:

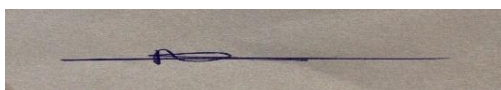
$$\pi = iMRT \quad (4)$$

i es el número de especies iónicas en las que se disociará cada molécula de soluto si el soluto es un electrolito. Esta relación solo es válida cuando el soluto está tan diluido que se comporta como una solución ideal (es decir, en efecto está infinitamente diluido), lo que no es el caso durante la operación de FO donde se pueden emplear soluciones de alimentación y extracción altamente concentradas. Para soluciones más concentradas, se puede agregar un coeficiente de presión osmótica, ϕ , como factor de corrección.

Solución de extracción (DS)

La solución de extracción es una solución con una alta concentración de solutos preparada para crear un gradiente de presión osmótica sustancial esencial para extraer agua de la corriente de alimentación a la solución de extracción (DS) [17]. La desalinización *directa* utiliza agua salina como solución de extracción, la selección de un soluto de extracción adecuado es de suma importancia. Para elegir una solución de extracción eficaz, se deben cumplir varios criterios:

- debe ser capaz de generar una presión osmótica lo suficientemente alta como para permitir una fuerza impulsora eficaz para el proceso de FO.
- debe tener una viscosidad baja para permitir un bombeo fácil en el sistema y mejores flujos de agua.
- debe estar disponible en grandes cantidades a bajo costo;
- debe ser fácil de reconcentrar a un costo competitivo;



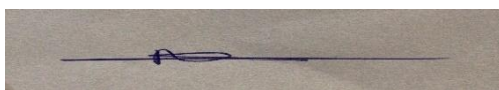
- debe ser altamente soluble (bajo costo, no tóxico, fácilmente separable y reutilizable, y ecológico)

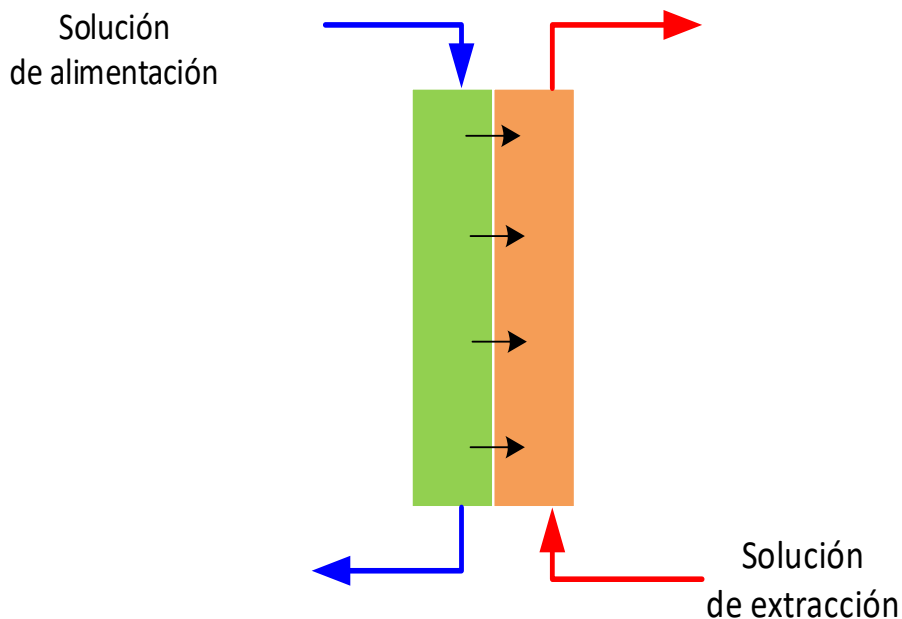
2.2.2. Principio de operación

En un sistema de osmosis directa, una solución de alimentación, como aguas residuales industriales (alimentación), fluye por un lado de la membrana, mientras que una solución de extracción con una salinidad total disuelta (TDS) más alta fluye por el otro lado [16]. La diferencia de TDS entre los dos lados crea una presión osmótica que induce al agua a fluir desde la solución de alimentación a través de la membrana hacia la solución de extracción, mientras retiene todos los contaminantes en la corriente de alimentación. A medida que el agua pasa por la membrana, la solución de extracción se diluye y la solución de alimentación se concentra, lo que produce un efluente concentrado. La solución de extracción puede consistir en una simple mezcla de sal y agua o en una sustancia especialmente diseñada para la aplicación[18]. La permeación de agua a través de la membrana generalmente se evalúa midiendo el incremento de peso del DS utilizando una balanza. Por el contrario, el medidor de conductividad generalmente se utiliza para determinar la variación de conductividad en el FS.

Figura 2

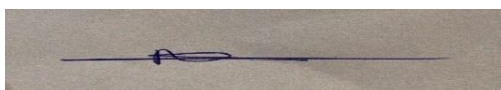
Esquema del proceso de desalinización por ósmosis directa





2.2.3. Membrana de osmosis directa

Las membranas son un componente crítico del proceso de FO, permitiendo que las moléculas de agua pasen a través de ellas mientras retienen los solutos. Las propiedades de las membranas utilizadas en la desalinización por FO son esenciales para la eficiencia y eficacia del proceso. La membrana debe ser estable en condiciones de operación, incluyendo temperatura, pH y concentración de sal, asegurando la estabilidad de la membrana sin degradación, incluso para múltiples ciclos[18]. La elección de la membrana depende de la aplicación específica y las condiciones de operación. Las membranas de FO se pueden limpiar mediante diversos métodos, como el retrolavado, el lavado con aire y la limpieza química. Es fundamental utilizar soluciones de limpieza compatibles con el material de la membrana y seguir las instrucciones del fabricante para la limpieza y el mantenimiento. Se han utilizado varias membranas en la desalinización de FO, incluidas las de acetato de celulosa y poliamida[19]. A pesar de los avances logrados por las tecnologías basadas en membranas, el ensuciamiento sigue siendo el problema más desafiante en su implementación industrial. El ensuciamiento se define como un proceso en el que las partículas coloidales, la materia orgánica e inorgánica y los materiales biológicos se depositan en la superficie de la membrana



o en los poros de la membrana durante la filtración[4]. En la tabla 1 se muestra las ventajas y desventajas de dos tipos de membranas de osmosis directa comerciales.

Tabla 1

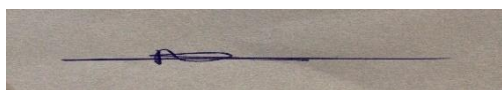
Ventajas y desventajas de las membranas

Membrana	Ventajas	Desventajas
Acetato de celulosa	Costo relativamente bajo en comparación con otros tipos de membranas. Buena permeabilidad a las moléculas de agua.	Propenso a ensuciarse, lo que puede reducir el flujo de agua Durabilidad imitada, generalmente requiere reemplazo después de varios ciclos.
poliamida	se puede utilizar en una amplia gama de condiciones de funcionamiento. Alta selectividad para moléculas de agua sobre solutos. Alta permeabilidad a las moléculas de agua.	Estabilidad limitada en entornos con alto contenido de sal o pH alto Más caras que las membranas de acetato de celulosa. Propenso a degradarse en condiciones de alto pH o alta salinidad.

2.2.4. Pretratamiento del agua de alimentación

El pretratamiento adecuado del agua de alimentación es fundamental para reducir la contaminación de la membrana y prolongar su vida útil[19]. Los pasos y tecnologías de pretratamiento específicos necesarios dependerán de la calidad del agua de alimentación y del tipo de membrana que se utilice. las pautas generales para el pretratamiento del agua de alimentación para reducir las incrustaciones son:

1. **Filtración:** La filtración es a menudo el primer paso en el pretratamiento del agua de alimentación para membranas. Esto puede incluir filtros de sedimentos para eliminar partículas más grandes y filtros de carbón activado para eliminar materia orgánica (OM) y cloro[20] .
2. **Ablandamiento:** si el agua de alimentación es dura (con un alto contenido de calcio y magnesio), puede ser necesario un paso de ablandamiento para evitar la



formación de incrustaciones en la superficie de la membrana. Esto se puede hacer utilizando resinas de intercambio iónico o ablandamiento con cal [10].

3. Ajuste del pH: ajustar el pH del agua de alimentación puede ayudar a prevenir la formación de incrustaciones o suciedad al mantener los minerales disueltos en la solución. El rango de pH óptimo dependerá de la membrana específica que se utilice [12].

4. Antiincrustantes: Se pueden añadir antiincrustantes al agua de alimentación para evitar la formación de incrustaciones o suciedad en la superficie de la membrana. Estos productos químicos actúan uniéndose a los iones minerales y manteniéndolos en solución.

5. Cloración (u oxidación): la cloración (u oxidación) puede eliminar u oxidar la materia orgánica del agua de alimentación. Esto puede ayudar a prevenir la contaminación de la membrana al reducir la cantidad de materia orgánica que se acumula en la superficie de la membrana [6].

Desinfección ultravioleta (UV): la desinfección ultravioleta puede matar bacterias y otros microorganismos presentes en el agua de alimentación. Esto puede ayudar a prevenir la bioincrustación de la membrana [18].

2.2.5. Indicadores de evaluación del equipo de osmosis directa.

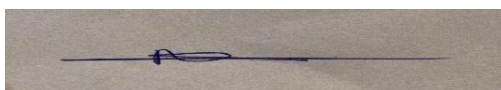
El flux de agua a través de la membrana se determina tomando los cambios en el volumen de la solución de alimentación, como se indica en la ecuación 5.

$$J_w = \frac{\Delta V}{S \Delta t} \quad (5)$$

Donde, J_w es el flujo de agua ($\text{Lm}^{-2} \text{h}^{-1}$), ΔV es el cambio en el volumen de la solución de alimentación (L), Δt es el intervalo de tiempo (h) para el cambio de volumen de ΔV , y S es el área de superficie de la membrana activa (m^2).

En ausencia de efectos de polarización de concentración, el flujo de agua ideal o teórico se calculó mediante la siguiente ecuación

$$J_w = A(\pi_d - \pi_f) \quad (6)$$



donde, A es el coeficiente de permeabilidad al agua de la membrana ($\text{ms}^{-1} \text{Pa}^{-1}$), π_D , es la presión osmótica de la solución de extracción (Pa), y π_F , es la presión osmótica de la solución de alimentación (Pa).

El flujo de soluto de extracción inversa se determinó utilizando agua desionizada pura como solución de alimentación y midiendo las concentraciones inicial y final de la solución de alimentación. Se utilizó la siguiente ecuación para calcular el flujo de sal [21].

$$LJ_s = \frac{C_f V_f - C_0 V_0}{S \Delta t} \quad (7)$$

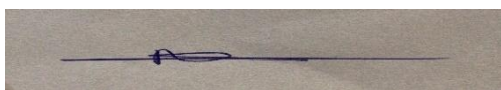
donde, J_s es el flujo de sal inverso ($\text{gm}^{-2} \text{h}^{-1}$), C_0 y C_f son las concentraciones de alimentación inicial y final (g/L), respectivamente, V_0 y V_f son los volúmenes inicial y final de la solución de alimentación (L), respectivamente, Δt es el intervalo de tiempo (h), y S es el área de superficie de la membrana activa (m^2). Por lo tanto, el factor de rechazo de la membrana se determina en función del rechazo total de los componentes disueltos en la solución de alimentación por la membrana de acetato de celulosa. El factor de rechazo (R) se calculó utilizando la ecuación:

$$\%R = \left(\frac{C_f - C_p}{C_f} \right) \times 100\% \quad (8)$$

donde C_p es la concentración de sal de la DS, y C_f es la concentración del FS donde R es el porcentaje de rechazo de sal. Del mismo modo, el volumen de permeado puede determinarse a partir de la disminución del volumen inicial del FS a lo largo del tiempo. Así la recuperación del sistema de FO se calcularía utilizando la Ec. (9)

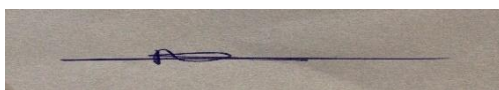
$$R = \left(\frac{V_p}{V_f} \right) \times 100\% \quad (9)$$

Donde V_p es el volumen del permeado y V_f es el volumen inicial de la solución de alimentación.



2.3. Definición de términos básicos

- La ósmosis directa (FO) : Es un proceso de separación por membrana que utiliza una solución de extracción altamente concentrada con un alto potencial osmótico para extraer agua a través de una membrana semipermeable desde una fuente de alimentación.
- solución de extracción: Solución de extracción (DS) con una presión osmótica más alta que la solución de alimentación para crear una fuerza impulsora que extrae agua dulce a través de la membrana.
- La solución de alimentación: Es la mezcla acuosa inicial que contiene los solutos a separar, la cual fluye por un lado de la membrana semipermeable
- El agua salobre: es una mezcla de agua dulce y agua salada, con un contenido de sal que es menor que el del agua del mar pero mayor que el del agua dulce. Se encuentra comúnmente en zonas costeras, estuarios y manglares, donde el agua del océano se mezcla con ríos o aguas subterráneas.
- La presión osmótica: es la presión que se necesita aplicar a una solución para evitar que el solvente (por lo general, agua) se difunda a través de una membrana semipermeable
- Diseño d experimentos: El diseño de experimentos es una metodología utilizada para planificar, ejecutar y analizar experimentos de manera sistemática
- Diseño factorial: El diseño factorial es una técnica estadística utilizada en experimentos para estudiar el efecto de múltiples factores sobre una variable de interés.
- Membranas de polímeros sintéticos: Estas son las más comunes y están hechas de materiales como poliamida, polietileno y polisulfona. Son altamente selectivas, lo que significa que permiten el paso de agua pero limitan la difusión de solutos, ofreciendo una alta permeabilidad y resistencia a la fouling.



III HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1. Formulación de la Hipótesis (General y específicas)

Hipótesis General

Tras una evaluación de las condiciones operativas del módulo de ósmosis directa en condiciones de laboratorio controladas, se puede iniciar el proceso de desalinización de agua salobre. En este contexto, la recuperación de agua en la corriente de solución de extracción alcanza valores entre el 70% y el 90%.

Hipótesis Específicas

1. La variación de concentración en la solución de extracción nos permite conocer los caudales de agua de la solución de alimentación, que pasan por la membrana, los cuales se encuentran en el rango de (0,2 a 5 L/h de agua).
2. Evaluando las variaciones en la concentración de la alimentación (agua salobre), se determinaron los flujos de agua de la solución de alimentación, los cuales se situaron en el rango de 0,5 a 5 L/h.

3.1.1. Operacionalización de variable

Definición conceptual de variables

1. Concentración de la solución de extracción (X_1)

La concentración de la solución de extracción es la relación entre la cantidad de soluto en gramos (NaCl) y volumen de solución. Para evaluar la influencia de la concentración en el flujo de agua se prepararán tres diferentes concentraciones de nivel bajo, medio y alto.

$$C = \frac{m}{V}$$

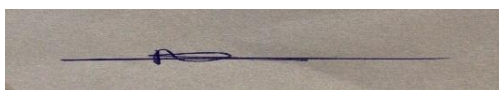
Donde, C, concentración de la solución m, masa de la sal y V, volumen de la solución

2. Flujo de la solución de extracción (x_2)

Es la relación entre el volumen transportado de la solución s por unidad de tiempo, para calcular el flujo se utiliza la ecuación.

$$q = \frac{V}{t}$$

q : flujo volumétrico (L/min), t tiempo (s)



➤ Variables Dependientes o de Respuesta (Y)

1. Porcentaje de recuperación de agua (Y₁)

El porcentaje de recuperación de agua se efectuará controlando el volumen de agua con respecto al agua

2. Flux de agua Y₂)

Es el flujo de agua que pasa desde la solución de alimentación hacia la solución de extracción (L/h.m²)

Tabla 2

Operacionalización de las variables independientes

Nº	Variable Independiente	Dimensión	Indicadores	Método
1	Concentración de la solución de extracción (X ₁).	Concentración de alimentación de NaCl.	g/L	Pesado
2	Flujo de alimentación (X ₂).	flujo	L/h	Flujómetro
3	Concentración de la solución de alimentación (X ₃)	Concentración de alimentación de NaCl.	g/L	Pesado

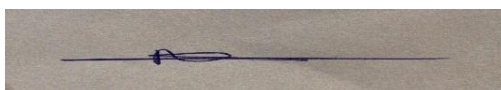


Tabla 3*Operacionalización de las variables dependientes.*

N°	Variable Dependiente	Dimensión	Indicadores	Método
1	Porcentaje de recuperación de agua (Y ₁).	Relación entre el volumen de agua permeada (producida) y el volumen total de agua de alimentación, expresado en porcentaje n	%	Uso de ecuaciones
2	Flux de agua (Y ₂).	volumen de permeado recolectado (V _p) dividido por el área activa de la membrana (A) y el tiempo (t):	L/h m ²	Medida de volumen

IV METODOLOGIA DEL PROYECTO

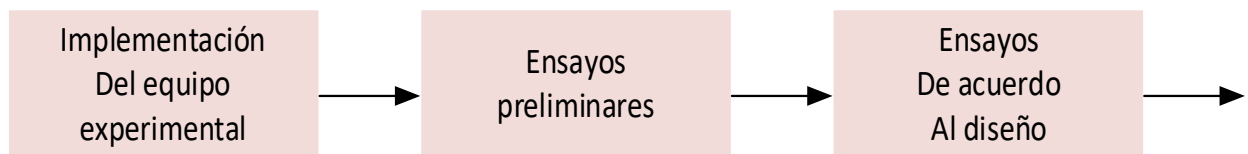
4.1. Diseño metodológico

Por el propósito del estudio, es una investigación aplicada. Por los medios utilizados en su desarrollo para obtener los datos, es de tipo experimental. Por el nivel de conocimientos que se adquieren, es de tipo correlacional. Según la naturaleza de la información que se recoge para responder al problema de investigación, es de tipo cuantitativa. La investigación según Código UNESCO es de 3303 de Ingeniería y Tecnología Químicas. La investigación se encuentra ubicada en la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) en el área principal de Ingeniería de procesos (2.04.02)

El diseño de la investigación ha considerado tres etapas, las cuales se muestra en la figura 3.

Figura 3

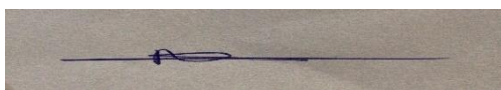
Etapas de la investigación



En la primera etapa de la investigación, en base a la revisión de la teoría vinculada a los principios de las membranas de osmosis directa como los tipos de membrana, factores de variables de operación de la membrana indicadores de rendimiento de se procede a la implementación del equipo experimental.

En la segunda etapa de investigación, se instala el equipo experimental y se efectúa las pruebas preliminares para determinar a conductividad, concentración de las soluciones, flujo, instalación eléctrica.

En la última etapa se efectuará las corridas experimentales de acuerdo al diseño experimental propuesto y reacción del trabajo final



4.2. Método de investigación

El método de investigación adoptado será experimental, basado en la aplicación controlada de la ósmosis directa para evaluar la eficiencia de las concentraciones de soluciones osmóticas en la desalinización de agua salobre. Se desarrollará un diseño factorial que permita analizar el efecto de variables independientes como la concentración salina de ambas soluciones sobre parámetros de flujo y rechazo de sales. Los resultados se registrarán y analizarán estadísticamente para determinar el desempeño óptimo del sistema bajo condiciones de operación específicas.

4.3. Población y muestra

Para llevar a cabo la investigación experimental, las soluciones sintéticas del agua salobre, se formularán meticulosamente para que sirvan como medio de extracción, utilizando agua destilada junto con cloruro de sodio de calidad analítica.

Las concentraciones de las soluciones de extracción se predeterminarán de acuerdo con el diseño experimental especificado. Cada ensayo experimental utilizará un volumen de muestra de 2 litros, correspondiente a las limitaciones de capacidad del aparato experimental.

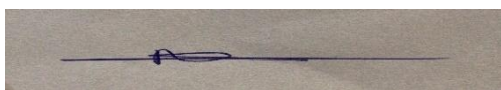
4.4. Lugar de estudio y periodo desarrollado

El trabajo experimental se ha desarrollado en el centro de investigación de ingeniería del agua de la Facultad de ingeniería Química de la Universidad Nacional del Callao. El periodo de ejecución es de 1 de enero 2025 a 31 de diciembre de 2025.

4.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

4.5.1 Reactivos químicos

En todos los experimentos, tanto los solutos de alimentación como los de extracción se toman cloruro de sodio, las soluciones se prepararon disolviéndolo en la cantidad adecuada en agua desionizada de procedencia de un módulo de ósmosis inversa. El cloruro de sodio fue de grado reactivo (99.9%). Se seleccionó



el cloruro de sodio debido a su alta solubilidad, alta presión osmótica y bajo potencial de incrustación en la membrana. La conductividad de las soluciones de extracción y de alimentación se controló utilizando el conductímetro ADWA(AD310).

4.5.2. Instrumentos

Los valores de conductividad fueron medidos mediante un equipo digital multímetro portátil HQ40D, de Hach. El caudal fue evaluado tomando un volumen en una unidad de tiempo y los niveles de variación de las alturas de las soluciones fueron medido mediante la variación de altura en mm con respecto al tiempo.

4.5.3. Membrana

En este estudio se utilizó membrana comercial de fibra hueca HFFO2 (Aquaporin Inside) de FO, adquirida desde Sterlitech Corporation (USA). Las características de la membrana se indican en la tabla 3. Los valores se obtuvieron del fabricante de la membrana.

Tabla 4.

Características de la membrana HFFO2.

Parámetro	Unidad	Valores
Área de la membrana	m ²	2.3
Flux	LMH(L/m ² h)	11 ± 1.5
Temperatura	°C	5-30
pH	3-10

En la figura 4, se muestra la membrana de osmosis directa utilizada en los experimentos.

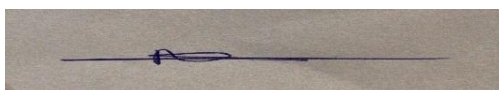


Figura 4.

Fotografía de la membrana de osmosis directa

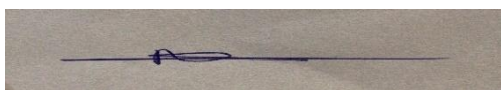
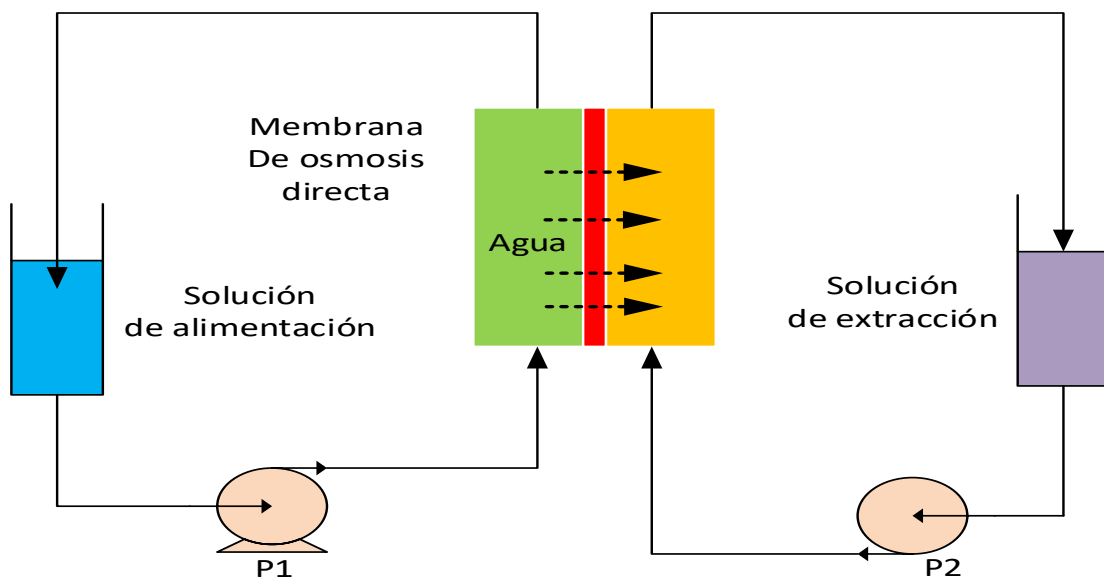


4.5.4. Equipo experimental

En la figura 5 se muestra una representación esquemática simplificada de la instalación del aparato experimental, que comprende: una membrana de ósmosis directa, dos mecanismos de bombeo y dos depósitos de alimentación con una capacidad de 1.2 L cada recipiente. El extractante es una solución de cloruro de sodio con diferentes concentraciones y la solución de alimentación es una solución de cloruro de sodio, de concentración muy cercana al agua salobre

Figura 5

Configuración de la membrana del equipo experimental



4.5.5. Diseño experimental

Se propone un diseño factorial con tres factores como, la concentración de la solución de alimentación, flujo de la solución de alimentación y concentración de la solución de extracción. Las tres variables operativas y los niveles considerados para cada variable se presentan en la Tabla 3. Los experimentos se efectuarán con replica y se reportarán el promedio para cada ensayo efectuado. La matriz de experimentación se muestra en la tabla 5.

Tabla 5

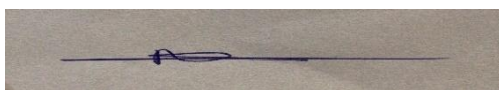
Factores y niveles del diseño factorial

N°	Factores	Notación	Unidades	Niveles		
1	Concentración de solución de alimentación	X1	g/L	1.5	3	
2	Flujo de alimentación	X2	mL/min	600	1000	
3	Concentración de la solución de extracción	X3	g/L	15	25	35

Tabla 6

Matriz de experimentación.

N°	X1	X2	X3
1	1.5	600	15
2	1.5	600	25
3	1.5	600	35
4	1.5	1000	15
5	1.5	1000	25
6	1.5	1000	35
7	3	600	15
8	3	600	25
9	3	600	35
10	3	1000	15
11	3	1000	25
12	3	1000	35



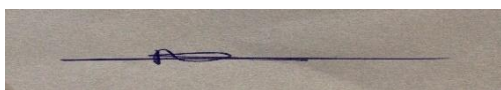
4.6. Análisis y procesamiento de datos.

Con los datos obtenidos experimentalmente, se efectuará un análisis estadístico descriptivo, luego mediante el programa estadístico Minitab 17 se analizará el efecto de las variables operativas sobre el rendimiento del equipo experimental.

Para la elaboración de las figuras se ha utilizado el software Origin, utilizado ampliamente en campos de ingeniería e investigación.

4.7. Aspectos Éticos en Investigación

La Propuesta del proyecto está asociada al Código de Ética de la Investigación de la Universidad Nacional del Callao, según lo estipulado en la Resolución núm. 260-2019-CU del Consejo Universitario.



V RESULTADOS

5.1. Resultados descriptivos

En la tabla 7 se muestran los resultados del porcentaje de recuperación de agua para cada ensayo, según el diseño experimental propuesto. La recuperación de agua se sitúa entre 44.66 % a 95.48 %. De manera similar, se reporta los resultados del flujo de agua se encuentra en los niveles de 1.34 a 3.36 respectivamente

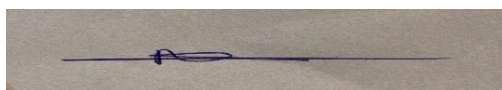
Tabla 7. Matriz del diseño factorial y respuestas.

N°	X1	X2	X3	V _R (%)	Flux (L/m ² h)
1	1.5	600	15	73.6667	1.79
2	1.5	600	25	94.6667	2.46
3	1.5	600	35	90.2941	2.24
4	1.5	1000	15	75.3247	2.243
5	1.5	1000	25	95.4839	2.8
6	1.5	1000	35	91.7143	2.8
7	3	600	15	44.6667	3.36
8	3	600	25	70.3333	2.24
9	3	600	35	82.6667	2.8
10	3	1000	15	46.1290	1.34
11	3	1000	25	68.1250	2.24
12	3	1000	35	67.6136	2.91

La tabla 8 muestra los resultados estadísticos descriptivos para el porcentaje de recuperación del agua y flujo de agua.

Tabla 8.
Resultados descriptivos.

Variable	Media	Desv.Est.	Varianza	Mínimo	Máximo
recuperación de agua (%)	75.06	17.21	296.14	44.67	95.48
Flujo de agua	2.43	0.543	0.295	1.34	3.36

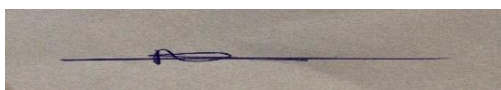
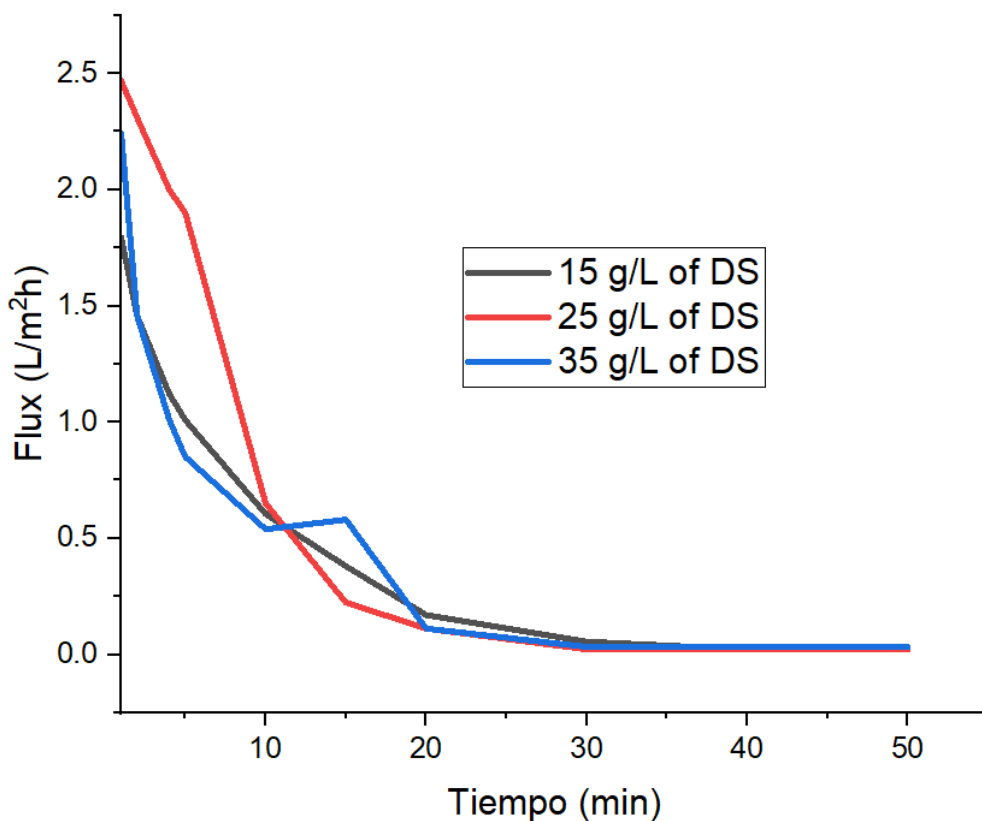


1. Efecto de la concentración de la solución de extracción sobre el flux del agua

En la figura 6 se observa el efecto del tiempo de tratamiento sobre el flux de agua para las concentraciones de 15,25 y 35 30 g/L de cloruro sódico. Los resultados muestran que la concentración de la solución de extracción influye sobre el flux del agua que atraviesa la membrana en función del tiempo. Así mismo, se observa que el flux aumenta conforme se incrementa la concentración de la solución de extracción (NaCl). Investigadores han informado, el flujo de agua aumenta con una mayor concentración de NaCl, pero la polarización de concentración interna (ICP) se vuelve más fuerte, lo que reduce la fuerza impulsora efectiva con el tiempo.

Figura 6.

Flux de agua vs. tiempo (FS = 3 g/L NaCl; Q = 1000 L/min)

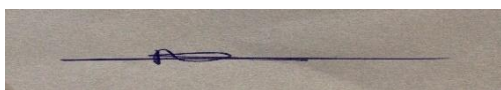
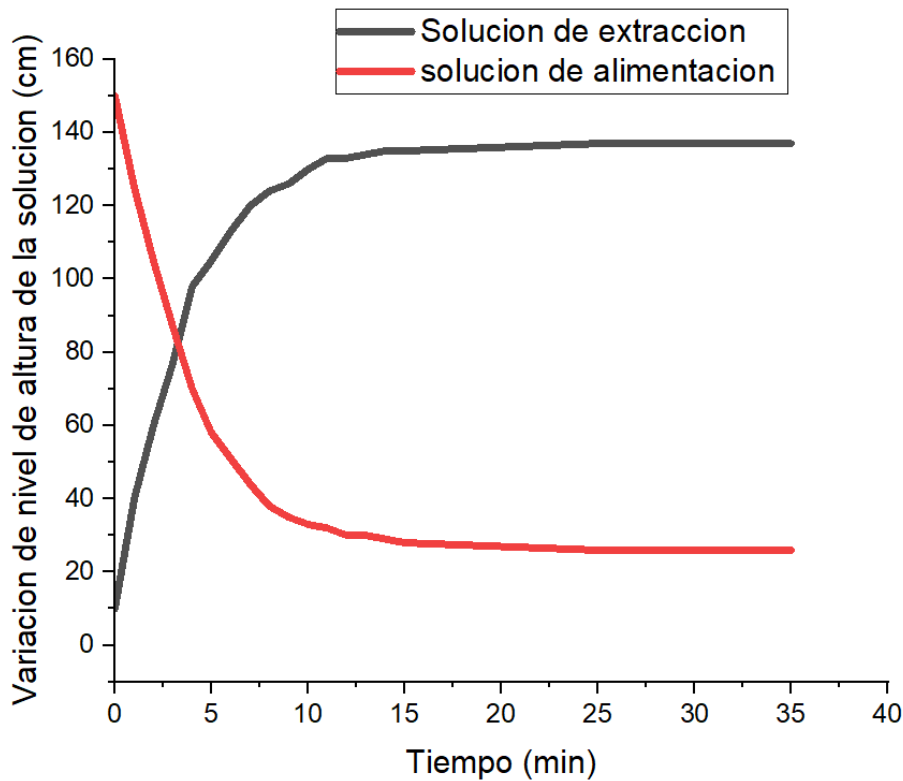


2. Cambios de los niveles de solución a lo largo del tiempo de tratamiento

En la figura 7, se muestran los cambios de los niveles (altura) de la solución de alimentación y extracción durante el tratamiento. Según los resultados, el nivel de la solución de alimentación disminuye con el tiempo porque el agua se mueve por ósmosis hacia la solución de extracción. Asimismo, se puede observar cómo el nivel de la solución de extracción aumenta a medida que avanza el tratamiento. Se puede observar que, en los primeros 5 minutos, la difusión del agua muestra una correlación lineal con el paso del tiempo; después, entre los 5 y los 10 minutos, los cambios son más pausados.

Figura 7.

Variación del nivel de FS y DS vs. tiempo.

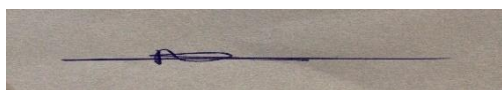
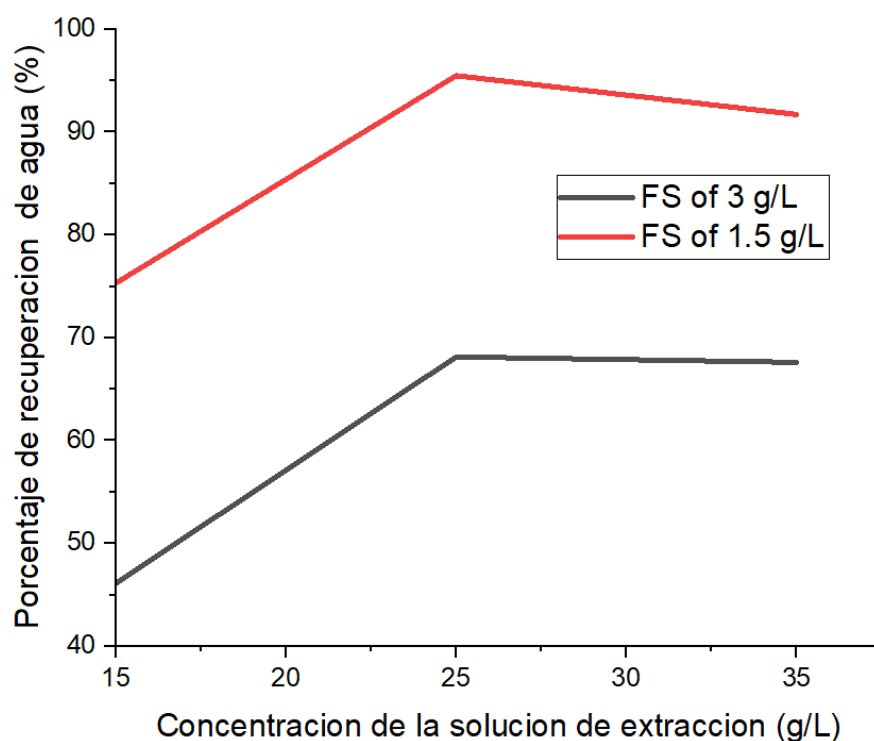


3. Efecto de la concentración de la solución de alimentación sobre la recuperación de agua

La figura 8 muestra el efecto de la concentración de DS sobre el porcentaje de recuperación de agua. Se observa que, a medida que la concentración de DS aumenta de (15 a 25 g/L NaCl) , se alcanza un porcentaje comprendido entre el (75 % a 95 %), mientras para una solución de 35 g/L mostró una ligera disminución, manteniendo una concentración fija de FS de 1. 5g/L. Así mismo, se observa para una concentración de 3 g/L de solución de alimentación el incremento de la recuperación de agua desde (45 a 65 %) y para 3 g/L una ligera disminución.

Figura 8.

Recuperación de agua (%) vs. concentración de DS.



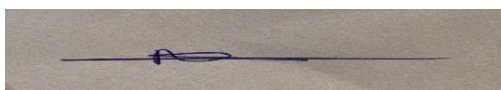
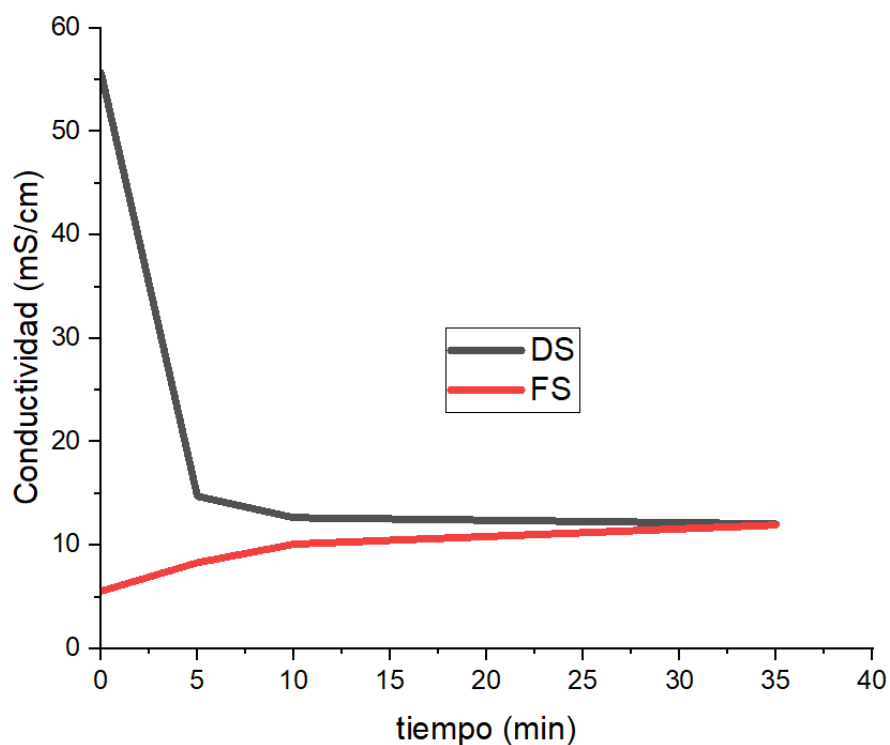
4. Cambios de la conductividad de las soluciones de alimentación y extracción en función del tiempo de tratamiento.

En la figura 9, se muestran los cambios de los niveles de conductividad para las soluciones de alimentación y extracción según el tiempo de tratamiento. En los primeros cinco minutos, la conductividad eléctrica de la solución de alimentación y extracción muestra los cambios más pronunciados en los niveles de conductividad.

Esto se debe a la existencia de una mayor diferencia de presión osmótica ($\Delta\pi$) durante los intervalos iniciales. Del mismo modo, en la figura 8 se muestra que la conductividad de la alimentación de FO aumentó de 5.56 mS/cm a 11.96 mS/cm, mientras que la conductividad de la solución de extracción disminuyó de 55.7 mS/cm a 12.05 mS/cm. Recientes estudios han reportado un aumento lineal en la conductividad de la solución de alimentación como función del tiempo, debido a la difusión de solutos de la solución de extracción (NaCl) [22].

Figura 9.

Variación de la Conductividad de FS y DS vs. tiempo.



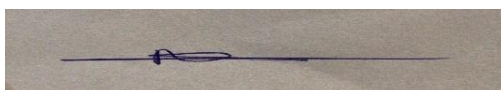
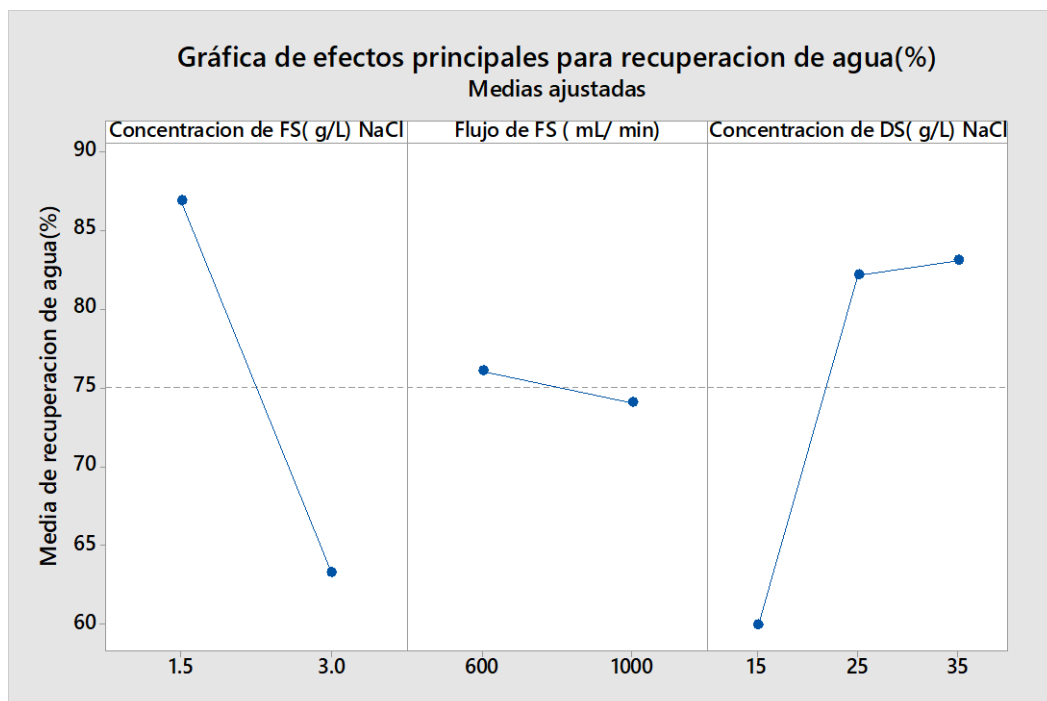
5.2. Resultados inferenciales

1. Efecto de las variables operativas sobre el porcentaje de recuperación de agua

En la figura 10 se muestra que un mayor nivel de concentración de la solución de extracción mejora el porcentaje de recuperación de agua en el módulo de ósmosis directa. Con concentraciones de alimentación en los niveles de 15, 25 y 35 g/L, las recuperaciones medias de agua que se consiguen son de 59.9, 82.14 y 83.06 %. Estudios anteriores han informado que para una alimentación de NaCl (5 g/L), se ha observado que el uso de una solución de extracción de NaCl de 35 g/L produce una recuperación de agua más elevada (~46-51 %) [23].

Figura 10

Efecto de los factores sobre la recuperación de agua (%).

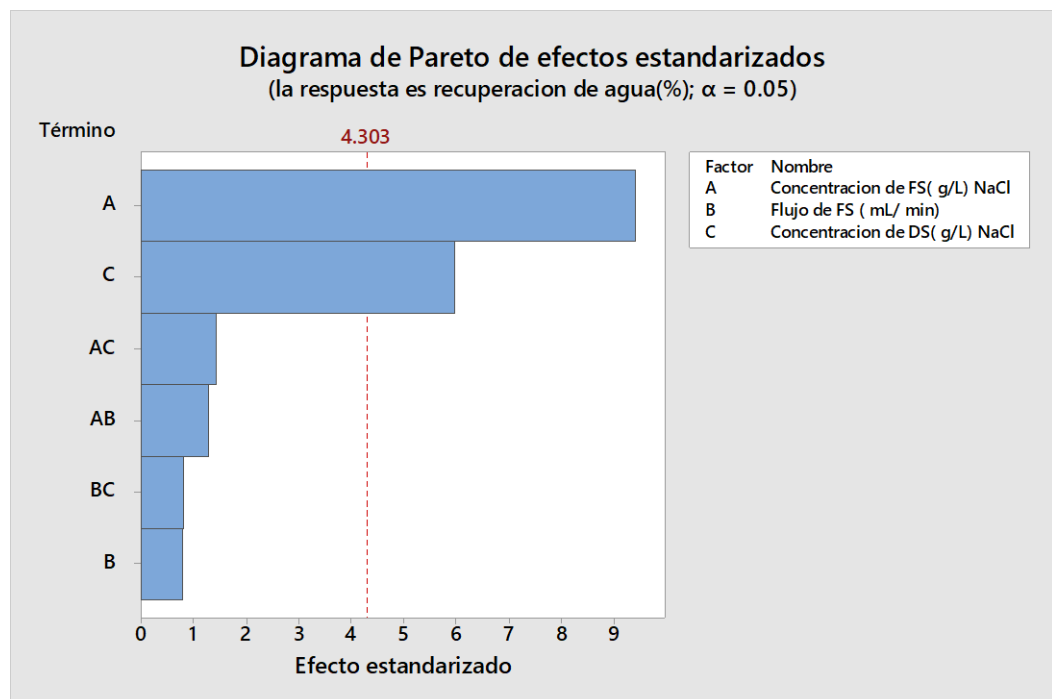


2. Pareto análisis

El efecto de los factores principales y sus interacciones sobre la variable de respuesta podemos verlo mediante un diagrama de Pareto. En el diagrama de Pareto, la barra que cruzan la línea de referencia (gráfico vertical) con barras horizontales (factores e interacciones) son estadísticamente significativas. La figura 11 muestra que la línea horizontal (factor A y B) cruza la línea de base en 2.4. Estos factores (A y B) son estadísticamente significativos a un nivel de 0.05. Del mismo modo, se observa que la interacción AB no contribuyen de manera significativa. Así mismo, se observa que la variable de mayor importancia es el factor A (concentración de la solución de alimentación) sobre la recuperación de agua.

Figura 11

Efecto de los factores.



VI DISCUSION DE RESULTADOS

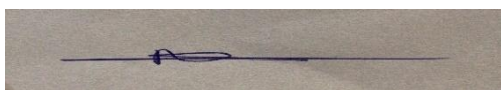
6.1 Contratación y demostración de la hipótesis con los resultados

En esta investigación, se ha planteado la siguiente hipótesis general y específicas

1. Tras una evaluación de las condiciones operativas del módulo de ósmosis directa en condiciones de laboratorio controladas, se puede iniciar el proceso de desalinización de agua salobre. En este contexto, la recuperación de agua en la corriente de solución de extracción alcanza valores entre el 70% y el 90%. A partir de los resultados obtenidos, la Figura 10 muestra que el porcentaje promedio de recuperación de agua alcanzó el 75%. Asimismo, el valor máximo registrado fue del 95.48%, mientras que el mínimo correspondió al 60%. De la misma manera, la Tabla 6 muestra que, en el ensayo N° 5 (condiciones: 1,5 g/L de NaCl en la alimentación, flujo de alimentación de 1000 mL/min y 25 g/L en la solución draw), se obtuvo el mayor porcentaje de recuperación de agua: 95,48%.

Por consiguiente, los resultados experimentales confirman el logro del porcentaje de recuperación de agua propuesto (R), mediante la implementación de un sistema de osmosis directa (forward osmosis) a escala de laboratorio.

2. La variación de concentración en la solución de extracción nos permite conocer los caudales de agua de la solución de alimentación, que pasan por la membrana, los cuales se encuentran en el rango de (0.2 a 5 L/h de agua). En la Figura 6 se muestra la evolución del flujo de agua en función del tiempo de tratamiento, utilizando una solución de alimentación con una concentración de 3 g/L de NaCl y un caudal de 1000 L/min. Se evaluaron tres niveles de concentración de la solución extractora (15, 25 y 35 g/L). Se observa que el flujo máximo de agua, de 2.8 L/h·m², se alcanza al inicio del experimento. De manera análoga, se observa que el flujo de agua depende de la concentración de la solución de extracción. A menor concentración de NaCl, se obtiene un mayor flujo de agua. Asimismo, conforme avanza el tiempo experimental, el flujo de agua disminuye progresivamente hasta alcanzar un valor prácticamente constante después de 30 minutos de operación.



3. Evaluando las variaciones en la concentración de la alimentación (agua salobre), se determinaron los flujos de agua de la solución de alimentación, los cuales se situaron en el rango de 0,5 a 5 L/h.

De la Tabla 6 se observa que la variación en la concentración de la solución de alimentación no presenta diferencias significativas en el flujo de agua obtenido. Para los niveles de 1.5 y 3 g/L se alcanzaron valores de 2.36 y 2.48 L/h·m², respectivamente. Asimismo, en la Figura 8 se aprecia que una menor concentración de la solución de alimentación se asocia con un mayor porcentaje de recuperación de agua.

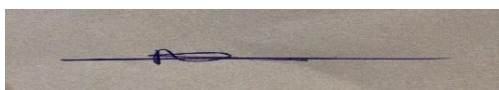
6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares

Recientes estudios han indicado una menor concentración de la solución de alimentación (es decir, menor salinidad de la alimentación) aumenta la diferencia de presión osmótica impulsora para una solución de extracción determinada, lo que da lugar a una mayor recuperación de agua en el módulo de ósmosis directa[24]Esta afirmación esta alineada a nuestro resultado obtenido.

En estudios experimentales sobre la desalinización con FO, de lixiviados de vertederos alcanzan tasas de recuperación de agua de entre el (60 - 80 %), los autores señalan que se obtienen tasas de recuperación más altas con entradas menos salinas [25].

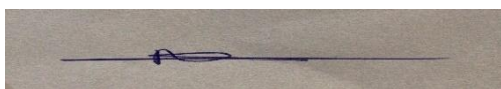
Investigadores han informado, el flujo de agua aumenta con una mayor concentración de NaCl, pero la polarización de concentración interna (ICP) se vuelve más fuerte, lo que reduce la fuerza impulsora efectiva con el tiempo. La disminución del flujo dependiente del tiempo es más pronunciada a altas concentraciones de NaCl (hasta 2 M) debido a la ICP y al flujo de sal inverso [26].

Otros estudios han evaluado la solución de extracción de NaCl (1–3 M) para el tratamiento de agua salobre en FO, el flujo de agua aumenta con la concentración de NaCl y es mayor a temperaturas elevadas; los perfiles de flujo dependientes del tiempo muestran un pico inicial seguido de estabilización [27].



6.3. Responsabilidad ética de acuerdo con los reglamentos vigente

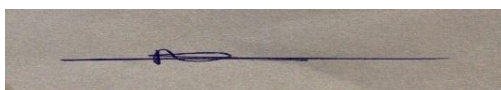
El autor se responsabiliza por la información emitida en el presente trabajo, de acuerdo con el Reglamento del Código de Ética de la Investigación de la UNAC, según Resolución de Consejo Universitario N° 260-2019-CU.

A rectangular area at the bottom left of the page containing a handwritten signature in blue ink.

VII CONCLUSIONES

En el presente estudio experimental, se ha evaluado tres factores sobre el porcentaje de recuperación de agua y flujo de migración de agua desde la solución de alimentación hacia la solución de extracción. La aplicación del método factorial ha permitido evaluar el impacto del de cada factor sobre la variable respuesta. Este trabajo también consistió en identificar el factor más significativo de cada variable respuesta mediante la gráfica de Pareto. A continuación, se presentan las conclusiones derivadas de este estudio.

1. Los resultados evidenciaron que el porcentaje de recuperación de agua está fuertemente influenciado por la concentración de las soluciones de alimentación y de extracción. Se obtuvo un mayor porcentaje de recuperación cuando la diferencia de concentración entre ambas soluciones fue más elevada, lo cual coincide con la teoría que relaciona dicha diferencia con el gradiente de presión osmótica entre las soluciones. El proceso alcanzó una eficiencia de recuperación de agua del 95.48% cuando se emplearon 1.5 g/L de NaCl en la solución de alimentación y 25 g/L de NaCl en la solución de extracción, manteniendo un flujo de alimentación de 1000 mL/min.
2. El flux de agua en el proceso de osmosis directa es dependiente de la concentración de la solución de extracción, se observa que el flujo máximo de agua, es de 2.8 L/h·m², se alcanza al inicio del experimento. Así mismo, se observa, conforme transcurre el tiempo de experimentación el flux disminuye lentamente hasta llegar el equilibrio osmótico.
3. La recuperación y flujo de agua dependen en gran medida de la salinidad de la solución de extracción (NaCl) y de la concentración de la alimentación (NaCl). Los ensayos del proceso FO revelaron que las soluciones de extracción a concentraciones de (15, 25 y 35 g/l de NaCl) mostraban un desempeño de recuperación de agua muy bueno. Utilizando 25 g/L como DS con 1.5 g/L de NaCl como FS, se obtuvo una recuperación de agua del 95,48 % y un flux de agua de 2.8 L/hm².



VIII IMPACTO EN SOCIEDAD

La experimentación de la desalinización por ósmosis directa tiene un impacto muy significativo en la sociedad.

1. Impactos Ambientales

- La ósmosis directa genera menos fouling que ósmosis inversa, ideal para agua salobre (menor salinidad que mar).

Impacto técnico

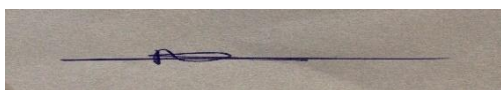
- Requiere menos energía para el proceso inicial de separación debido a la ausencia de bombas de alta presión

2. Impactos Operativos y Económicos

- Los Costos de desalinización salobre promedian 0,35 USD/m³, inferiores a mar (1 USD/m³), favoreciendo adopción en regiones como Perú. Estudios recomiendan priorizar agua salobre para minimizar huella ambiental.

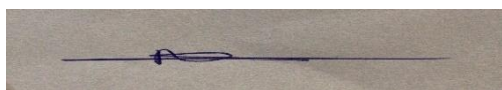
3. Limitaciones técnicas

- El flujo inverso de soluto hacia el permeado puede reducir la pureza del agua desalada, afectando la selectividad de la membrana.

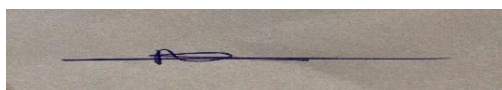


IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

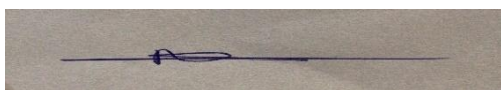
- [1] D. Vollmer *et al.*, “Integrating the social, hydrological and ecological dimensions of freshwater health: The Freshwater Health Index,” *Science of the Total Environment*, vol. 627, pp. 304–313, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.scitotenv.2018.01.040.
- [2] N. Ghaffour, T. M. Missimer, and G. L. Amy, “Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability,” *Desalination*, vol. 309, pp. 197–207, Jan. 2013, doi: 10.1016/j.desal.2012.10.015.
- [3] M. Qasim, M. Badrelzaman, N. N. Darwish, N. A. Darwish, and N. Hilal, “Reverse Osmosis Desalination: A State-of-the-Art Review.”
- [4] M. Tian, T. Ma, K. Goh, Z. Pei, J. Y. Chong, and Y. N. Wang, “Forward Osmosis Membranes: The Significant Roles of Selective Layer,” Oct. 01, 2022, *MDPI*. doi: 10.3390/membranes12100955.
- [5] K. P. S. Piash and O. Sanyal, “Design Strategies for Forward Osmosis Membrane Substrates with Low Structural Parameters—A Review,” Jan. 01, 2023, *MDPI*. doi: 10.3390/membranes13010073.
- [6] C. C. Yeh *et al.*, “Forward osmosis zwitterionic membranes for platelet concentration – Evaluation of the feasibility of the concept,” *Sep. Purif. Technol.*, vol. 354, Feb. 2025, doi: 10.1016/j.seppur.2024.129013.
- [7] M. Salamanca, M. Peña, A. Hernandez, P. Prádanos, and L. Palacio, “Forward Osmosis Application for the Removal of Emerging Contaminants from Municipal Wastewater: A Review,” Jul. 01, 2023, *Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI)*. doi: 10.3390/membranes13070655.
- [8] A. Akhtar, M. Singh, S. Subbiah, and K. Mohanty, “Sugarcane juice concentration using a novel aquaporin hollow fiber forward osmosis membrane,” *Food and Bioproducts Processing*, vol. 126, pp. 195–206, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.fbp.2021.01.007.
- [9] M. Ahmad, M. Abdel-Jawad, Y. Al-Wazzan, A. Al-Odwani, and J. Pallickal Thomas, “Experimental study of a cellulose triacetate spiral wound forward osmosis membrane for desalination process integration,” *Desalination Water Treat.*, vol. 66, pp. 50–59, Mar. 2017, doi: 10.5004/dwt.2016.11142.
- [10] S. Phuntsho, S. Vigneswaran, J. Kandasamy, S. Hong, S. Lee, and H. K. Shon, “Influence of temperature and temperature difference in the performance of forward osmosis desalination process,” *J. Memb. Sci.*, vol. 415–416, pp. 734–744, Oct. 2012, doi: 10.1016/j.memsci.2012.05.065.
- [11] M. Qasim, F. Mohammed, A. Aidan, and N. A. Darwish, “Forward osmosis desalination using ferric sulfate draw solute,” *Desalination*, vol. 423, pp. 12–20, Dec. 2017, doi: 10.1016/j.desal.2017.08.019.



- [12] Saiful, S. Hasima, N. Kamila, and Rahmi, "Cellulose acetate from palm oil bunch waste for forward osmosis membrane in desalination of brackish water," *Results in Engineering*, vol. 15, Sep. 2022, doi: 10.1016/j.rineng.2022.100611.
- [13] A. Aende, J. Gardy, and A. Hassanpour, "Seawater desalination: A review of forward osmosis technique, its challenges, and future prospects," Aug. 01, 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/PR8080901.
- [14] M. Zhang, J. Shan, and C. Y. Tang, "Gypsum scaling during forward osmosis process—a direct microscopic observation study," *Desalination Water Treat.*, vol. 57, no. 8, pp. 3317–3327, Feb. 2016, doi: 10.1080/19443994.2014.985727.
- [15] T. Y. Cath, A. E. Childress, and M. Elimelech, "Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments," Sep. 15, 2006. doi: 10.1016/j.memsci.2006.05.048.
- [16] F. Ricceri, M. Giagnorio, K. R. Zodrow, and A. Tiraferri, "Organic fouling in forward osmosis: Governing factors and a direct comparison with membrane filtration driven by hydraulic pressure," *J. Memb. Sci.*, vol. 619, Feb. 2021, doi: 10.1016/j.memsci.2020.118759.
- [17] H. W. Park, J. Baek, and W. J. Kim, "Forward osmosis and direct contact membrane distillation: Emerging membrane technologies in food and beverage processing," May 01, 2024, *Elsevier Ltd*. doi: 10.1016/j.ifset.2024.103626.
- [18] Y. K. Goi and Y. Y. Liang, "A general modeling framework for FO spiral-wound membrane and its fouling impact on FO-RO desalination system," *Desalination*, vol. 593, p. 118236, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.desal.2024.118236.
- [19] S. A. Hashemifard *et al.*, "Challenges of forward osmosis desalination processes using hydrogels as draw agents," *J. Memb. Sci.*, vol. 714, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.memsci.2024.123408.
- [20] M. Qasim, N. A. Darwish, S. Sarp, and N. Hilal, "Water desalination by forward (direct) osmosis phenomenon: A comprehensive review," Aug. 04, 2015, *Elsevier B.V.* doi: 10.1016/j.desal.2015.07.016.
- [21] G. Blandin, F. Ferrari, G. Lesage, P. Le-Clech, M. Héran, and X. Martinez-Lladó, "Forward osmosis as concentration process: Review of opportunities and challenges," Oct. 01, 2020, *MDPI AG*. doi: 10.3390/membranes10100284.
- [22] E. N. Sitabule and C. Buckley, "Forward osmosis treatment of thermal evaporator brine stream," *Water SA*, vol. 49, no. 1, pp. 26–35, Jan. 2023, doi: 10.17159/wsa/2023.v49.i1.3982.
- [23] M. Ahmed, "A study on the influence of feed and draw solution concentrations on the performance of the pilot-scale forward osmosis-membrane distillation system," *Desalination Water Treat.*, vol. 317, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.dwt.2024.100225.



- [24] J. Jeon, D. Kim, and S. Kim, "Energy Efficient Forward Osmosis to Maximize Dewatering Rates," *Membranes (Basel)*., vol. 15, no. 6, Jun. 2025, doi: 10.3390/membranes15060171.
- [25] J. Wang and X. Liu, "Forward osmosis technology for water treatment: Recent advances and future perspectives," Jan. 20, 2021, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.jclepro.2020.124354.



ANEXOS

Matriz de consistencia

Título "EVALUACIÓN DE LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE UN MÓDULO DE ÓSMOSIS DIRECTA PARA LA DESALINIZACIÓN DE AGUAS SALOBRES"

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO	HIPOTESIS GENERAL	VARIABLES E INDICADORES	INDICADORES
<p>¿En qué medida influye las condiciones de operación del módulo de ósmosis directa sobre la desalinización del agua salobre subterránea?</p> <p>Problemas específicos</p> <p>¿Cuál es el efecto de la variación en la concentración de la solución de extracción sobre el porcentaje de recuperación de agua en una solución modelo de agua salobre?</p> <p>¿Qué efecto tiene la variación de la concentración de alimentación sobre el porcentaje de recuperación flux de agua desde la solución de alimentación hacia la solución de extracción?</p>	<p>GENERAL</p> <p>Determinar las condiciones operativas mas adecuadas del proceso de ósmosis directa (FO) para facilitar la desalinización del agua salobre.</p> <p>Objetivos Específicos</p> <p>Evaluar el impacto de las alteraciones en la concentración de la solución de extracción sobre el porcentaje de recuperación de agua desde una solución modelo de concentración aproximada de agua salobre.</p> <p>Evaluar qué efecto tiene la variación de la concentración de la solución de alimentación sobre el flux de agua desde la solución de alimentación hacia la solución de extracción</p>	<p>Tras una evaluación de las condiciones operativas del módulo de ósmosis directa en condiciones de laboratorio controladas, se puede iniciar el proceso de desalinización de agua salobre. En este contexto, la recuperación de agua en la corriente de solución de extracción alcanza valores entre el 70% y el 90%.</p> <p>Hipótesis específicas</p> <p>La variación de concentración en la solución de extracción nos permite conocer los caudales de agua de la solución de alimentación, que pasan por la membrana, los cuales se encuentran en el rango de (0,2 a 5 L/h de agua).</p> <p>Evaluando las variaciones en la concentración de la alimentación (agua salobre), se determinaron los flujos de agua de la solución de alimentación, los cuales se situaron en el rango de 0,5 a 5 L/h.</p>	<p>$X =$ Concentración de la solución de extracción (X_1)</p> <p>Caudal de la solución de alimentación (X_2)</p> <p>Concentración de la solución de alimentación (X_3)</p> <p>$Y =$ Variable dependiente</p> <p>% de recuperación de agua (y_1)</p> <p>Flux de agua desde la solución de alimentación hacia la solución de extracción (y_2).</p>	<p>g/L</p> <p>L/h</p> <p>g/L</p> <p>%</p> <p>L/hm²</p>

