



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
UNIDAD DE INVESTIGACION

SEP 2019



INFORME FINAL DE INVESTIGACIÓN
“EVALUACIÓN DE LOS FACTORES DE OPERACIÓN DE
MEMBRANA NANOFILTRACIÓN EN LA
DESALINIZACIÓN DE AGUA SALOBRE”

AUTOR: ING. JUAN TAUMATURGO MEDINA COLLANA

Callao, 2019
PERÚ

DEDICATORIA

El presente trabajo investigación lo dedico a mi esposa, por la paciencia y darnos fuerza para continuar y culminar este trabajo de investigación.

Así mismo a mis hijos, Jhoel y Melissa por estar siempre presentes, acompañándonos y por el apoyo moral, que me brindaron a lo largo de esta investigación.



INDICE

DEDICATORIA	ii
INDICE DE FIGURAS	4
INDICE DE TABLAS	5
RESUMEN	6
ABSTRACT	7
INTRODUCCIÓN	8
I.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACION	9
1.1. Descripción de la realidad problemática	9
1.2. Formulación del problema	10
1.2.1 Problema general	10
1.2.2 Problemas específicos	10
1.3 Objetivos	11
1.3.1 Objetivo general	11
1.3.2 Objetivo específicos	11
1.4. Limitantes de la investigación	11
II. MARCO TEORICO	12
2.1 Antecedentes internacionales	12
2.2 Base Teórica	13
2.2.1 Teórico	13
2.2.2. Conceptual	18
2.2.3. Teórico – conceptual	21
2.3. Definición de Términos Básicos	22
III. HIPOTESIS Y VARIABLES	24
3.1 Hipótesis general y específica	24
3.1.1 Hipótesis general	24
3.1.2 Hipótesis específica	24
3.2 Variables	24
3.2.1 Definición conceptual	24
3.2.2 Operacionalizacion de las variables	25

IV.	DISEÑO METODOLOGICO	27
4.1	Tipo y diseño de la investigación	27
4.1.1.	Tipo de investigación	27
4.1.2.	Diseño de la investigación	27
4.1.3.	Diseño factorial	28
4.1.4	Matriz de diseño experimental	28
4.2	Método de investigación.	29
4.3	Población y muestra	29
4.3.1	Población	29
4.3.2	Muestra	29
4.4	Lugar de estudio	30
4.5	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	30
4.5.1	Técnicas analíticas	30
4.5.2	Medida de parámetros de proceso	30
4.5.3	Equipo experimental	30
4.5.4	Método	31
4.6	Análisis y procedimientos de datos	32
V.	RESULTADOS	33
5.1	Caracterización físico química del agua subterránea	33
5.2	Resultados del diseño experimental	34
5.2.1	Porcentaje de desalinización respecto a los parámetros de operación.	34
5.2.2	Porcentaje de recuperación de flujo respecto a los parámetros de operación	38
5.2.3.	Dureza total respecto a los parámetros de operación	39
5.2.4	Porcentaje de separación de solidos totales disueltos vs parámetros de operación.	39
5.3	Caracterización físico química del corriente de proceso	40
5.4	Resultados preliminares	41
5.4.1	Concentrados de osmosis inversa	41
5.1.2	Resultados a partir de soluciones modelos	45
VI.	DISCUSION DE RESULTADOS	55
6.1.	Contrastación de las hipótesis con los resultados de la caracterización físico química del agua subterránea	55



6.2	Contrastación de la hipótesis de los parámetros de operación del módulo de nanofiltración	56
6.2.1	Efecto de la presión	56
6.2.2	Efecto de la conductividad en la corriente de alimentación	56
6.2.3	Efecto de la temperatura	56
6.3	Contrastación de las hipótesis de la caracterización físico química del agua permeado	57
6.4	Contrastación de los resultados con otros estudios similares	58
VII.	CONCLUSIONES	59
VIII.	RECOMENDACIONES	61
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	62



INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Esquema de una membrana de nanofiltración	17
Figura 2: Esquema de un Sistema de Desalinización	17
Figura 3: Presión vs flux permeado	18
Figura 4: Esquema de un Sistema de Desalinización Simple	21
Figura 5: Esquema de un Sistema de desalinización simple con reciclo	22
Figura 6 : Diagrama general de proceso	27
Figura 7: Esquema del equipo experimenta de nanofiltración	31
Figura 8: Efectos principales para medias	35
Figura 9: Porcentaje de desalinización vs presión y conductividad	36
Figura 10: Porcentaje de desalinización vs conductividad y temperatura.	36
Figura 11: Porcentaje de desalinización vs Presión y temperatura	37
Figura 12: Grafica de optimización de los parámetros de operación	37
Figura 13: Efectos principales para medias de porcentaje de recuperación	38
Figura 14: Flujo de permeado vs presión de alimentación	42
Figura 15: Flujo de rechazo vs presión de alimentación	42
Figura 16: Porcentaje de recuperación de flujo vs presión	44
Figura 17 : Porcentaje de separación de sales vs presión	45
Figura 18: Flujo de permeado y rechazo vs presión	47
Figura 19: Flujo de rechazo y permeado con respecto a la presión de rechazo a la concentración de 3g/L de NaCl	48
Figura 20: Flujo de rechazo y permeado con respecto a la presión de rechazo a la concentración de 4g/L de NaCl	49
Figura 21: Flujo de rechazo y permeado con respecto a la presión de rechazo a la concentración de 4g/L de NaCl y 0,5 g de CaCl ₂	50
Figura 22: Conductividad de rechazo y permeado con respecto a la presión de rechazo a la concentración de 1g/L de NaCl	51
Figura 23: Conductividad de rechazo y permeado con respecto a la presión de rechazo a la concentración de 3g/L de NaCl	52
Figura 24: Conductividad de rechazo y permeado con respecto a la presión de rechazo a la concentración de 4g/L de NaCl	53
Figura 25: Flujo de rechazo y permeado con respecto a la presión de rechazo a la concentración de 4g/L de NaCl y 0,5 g de CaCl ₂	54



INDICE DE TABLAS

Tabla 1 :	Porcentaje de Retención de NaCl y NaSO ₄	12
Tabla 2:	Procesos de Desalinización.....	14
Tabla 3:	Salinidad de Diferentes Tipo de Agua.....	14
Tabla 4:	Relación conductividad vs solidos totales disueltos.....	21
Tabla 5:	Matriz de Experimentos	25
Tabla 6:	Operacionalización de las Variables Independientes.....	25
Tabla 7:	Operacionalización de las Variables Dependientes	26
Tabla 8:	Parámetros de operación y niveles en estudio	28
Tabla 9:	Matriz de Experimentación	29
Tabla 10:	Análisis de calidad de agua subterránea	33
Tabla 11:	Porcentaje de desalinización vs parámetros de operación.....	34
Tabla 12:	Porcentaje de desalinización vs parámetros de operación.....	38
Tabla 13:	Porcentaje de desalinización vs parámetros de operación.....	39
Tabla 14:	Porcentaje de desalinización vs parámetros de operación.....	39
Tabla 15:	Características físico químicas de agua de alimentación, permeado y rechazo al módulo de nanofiltración	40
Tabla 16:	Análisis de la calidad del agua salobre.....	41
Tabla 17:	Flujo vs presión.....	41
Tabla 18:	Parámetros físico químicos permeado vs presión de alimentación	43
Tabla 19:	Porcentaje de recuperación de flujo vs presión de alimentación	43
Tabla 20:	Porcentaje de separación de sales vs presión de alimentación.....	44
Tabla 21:	Concentración de cloruro de sodio y conductividad.....	46
Tabla 22:	Presión (psi) - Flujo (L/min).....	46
Tabla 23:	Presión (psi) - flujo (L/min).....	47
Tabla 24:	Presión (psi) vs flujo (L/min)	49
Tabla 25:	Presión (psi) – flujo (L/min).....	50
Tabla 26:	Presión (psi) – Conductividad (ms).....	51
Tabla 27:	Presión (psi) – Conductividad(ms).....	52
Tabla 28:	Presión (psi) – Conductividad (ms).....	53
Tabla 29:	Presión (psi) – Conductividad (ms).....	54
Tabla 30:	Análisis de calidad de agua subterránea	55
Tabla 31:	Análisis de calidad de agua desalinizada	57
Tabla 32:	Parámetros físico químicos de LMP y agua salobre.....	59
Tabla 33:	Parámetros físicos químico obtenidos	60



RESUMEN

Las aguas salobres por su cercanía al mar, generalmente presentan alta concentración de sales disueltas que hacen que no sea apta para el consumo directo por los seres humanos.

La nanofiltración es una tecnología emergente para la desalinización de baja energía, entre los muchos factores que permiten evaluar su desempeño de la membrana es la presión aplicada, temperatura de la solución de alimentación y la conductividad del agua de alimentación. En el estudio experimental se ha evaluado los parámetros de operación de un módulo de nanofiltración, presión (60, 100 psi), conductividad (3,4 -6,01 ms) mediante un diseño experimental factorial, como fuente de alimentación y temperatura (20, 28°C) se investigó utilizando agua salobre típica del distrito de Lurín, Lima -Perú. Su efecto fue analizado respecto a la conductividad, sólidos totales disueltos, flujo de permeado, rechazo, porcentaje de rechazo.

Los resultados más adecuados obtenidos de los parámetros e operación son presión de 100 psi, conductividad de alimentación de a y temperatura de 28 °C alcanzado un porcentaje de desalinización de 31,7 % y 80% de recuperación de flujo, la idoneidad como agua potable se verificó comparando con los estándares de calidad del agua, nos indica que no cumplen los estándares de calidad de acuerdo a la norma de nuestro país.

Palabras Claves: Nanofiltracion, Desalinizacion, agua salobre.



ABSTRACT

Brackish waters due to their proximity to the sea, generally have a high concentration of dissolved salts that make it unfit for direct consumption by humans.

Nanofiltration is an emerging technology for low energy desalination, among the many factors that allow you to evaluate your membrane performance is the applied pressure, temperature of the feed solution and the conductivity of the feed water. In the experimental study, the operating parameters of a nanofiltration module, pressure (60, 100 psi), conductivity (a, b) have been evaluated through a factorial design, as a power supply and temperature (20, 28 ° C) It was investigated using brackish water typical of the district of Lurín, Lima-Peru. Its effect was analyzed with respect to conductivity, total dissolved solids, permeate flow, rejection, rejection percentage:

The most adequate results obtained from the parameters and operation are pressure of 100 psi, feed conductivity of a and temperature of 28 ° C reached a percentage of desalination of 31.7% and 80% of recovery of flow, the suitability as drinking water is verified by comparing with water quality standards, it indicates that they do not meet the quality standards according to the norm of our country.

Keywords: Nanofiltration. Desalination, brackish water.



INTRODUCCIÓN

Una escasez creciente en las fuentes de agua dulce impulsó hacia recursos alternativos como el agua del océano y agua salobre esta última generalmente provenientes de aguas subterráneas.

Las aguas salobres por su cercanía al mar, generalmente presentan alta concentración de sales disueltas que hacen que no sea apta para el consumo directo por los seres humanos.

En la década de 1970, se comenzó a utilizar membranas para la desalinización del agua. Al probar con éxito la producción de agua purificada a partir del agua salada, las membranas de ósmosis inversa se convirtieron en una alternativa viable a las tecnologías basadas en la evaporación en el mercado de tratamiento de agua.

La nanofiltración es un proceso de separación que ha prosperado a lo largo de los últimos años. Es aplicada como pretratamiento de desalinización de agua de mar y aplicación directa de agua salobre para la obtención de agua potable.

La nanofiltración (NF) representa un desarrollo relativamente reciente en tecnología de membranas con características que se encuentran entre la ultrafiltración (UF) y la ósmosis inversa (RO). Las membranas NF capaces de separación de iones y solutos sin carga, representan un proceso de membrana único, preferentemente separa iones multivalentes de los monovalentes.

El rendimiento de las membranas generalmente se mide en términos de porcentaje de recuperación de flujo (R) y el porcentaje de separación de sales (S). En el estudio experimental se utilizó agua salobre proveniente de pozo del distrito de Lurín, se ha evaluado los parámetros de operación de la membrana de nanofiltración con respecto a la separación de sales disueltas.



I.- PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACION

1.1. Descripción de la realidad problemática

El crecimiento de la población y industrialización han aumentado las demandas de recursos hídricos confiables. Los efectos del cambio climático, que también está estrechamente relacionado con el rápido crecimiento, han complicado y exacerbado aún más el equilibrio entre la oferta y demanda del agua (Goh, P. S.). La desalinización de agua de mar y agua salobre es una alternativa de solución para hacer frente a esta falta de agua potable. La ósmosis inversa es la técnica más utilizada para la desmineralización del agua contaminada por exceso de sales. La nanofiltración es una nueva alternativa que viene en crecimiento en los últimos años y a futuro van a competir con la ósmosis inversa.

La desalinización del agua salobre es una forma efectiva de resolver la escasez mundial de agua, muchos países dependen de la tecnología de desalinización de esa forma viene superando la escasez de agua dulce en diferentes países del mundo. La escasez de agua ha estimulado la investigación y la aplicación de diversos enfoques para la desalinización del agua salobre y de mar. La escasez de agua potable es uno de los mayores problemas en el Sur de Lima, especialmente en los distritos de San Bartolo, Pucusana, Punta Hermosa, donde el suministro de agua es especialmente caro o incluso inexistente.

En estas áreas, resulta esencial usar el agua de los acuíferos, la mayoría de ellos con contaminación salina (generalmente por su proximidad al mar) y/o contaminados con nitratos. Los niveles de contaminación se sitúan entre 2-6 g/l para NaCl y entre 80-500 mg/l para NO_3^{1-} . La desalinización de agua salobre es un medio para obtener agua potable a bajo costo. El método de desalinización desarrollado estará basado en un sistema de nanofiltración. Entre las ventajas de usar esta tecnología es el uso de menor presión comparado a los sistemas de ósmosis inversa.



El creciente consumo de agua potable en los distritos del sur de Lima combinado con las actividades industriales y agrícolas aumentan la salinidad y el contaminante (por ejemplo, nitratos) Niveles en el agua. Los procesos de membrana de nanofiltración (NF) son más adecuados para la eliminación de iones de soluciones acuosas con flujos de permeado superiores a los obtenidos por ósmosis inversa a la misma presión aplicada. Por lo tanto, NF puede ser una buena opción, ya sea para reutilizar el agua salobre en muchas aplicaciones industriales o para obtener agua potable.

En el estudio experimental se utilizó agua salobre proveniente de pozo del distrito de Lurín y se ha efectuado pruebas preliminares con agua salobre proveniente de osmosis inversa y soluciones sintéticas preparadas a partir de reactivos químicos de grado analítico utilizando agua desionizada y reactivo de cloruro de sodio y cloruro de calcio de grado analítico.

1.2 Formulación del problema

Efectuar un estudio experimental responderá a las siguientes interrogantes:

1.2.1 Problema general

¿Cómo afecta los factores de operación en la desalinización de agua salobre mediante un proceso de membranas de nanofiltración?

1.2.2 Problemas específicos

1. ¿Cuál será los parámetros físicos químicos del agua salobre como fuente de alimentación a la membrana de nanofiltración para su desalinización?
2. ¿Cuáles serán los factores y niveles de operación de la membrana de nanofiltración en la desalinización de agua salobre?
3. ¿Cuál será las características físico químicas de las corrientes de concentrados y diluidas procedentes de la membrana de nanofiltración



1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Evaluar los factores de operación en la desalinización de agua salobre mediante un proceso con membrana de nanofiltración

1.3.2 Objetivo específicos

1. Caracterizar los parámetros físico químicos del agua salobre
2. Seleccionar los parámetros de operación para la desalinización
3. Evaluar los parámetros físico químicos de las corrientes de concentrado y diluidas procedentes del módulo de electrodiálisis metátesis

1.4. Limitantes de la investigación

De los diversos procesos de desalinización, se ha propuesto la desalinización de agua salobre, el uso de una membrana comercial de nanofiltración, la muestra para su desarrollo experimental ha sido extaido de distrito de Lurin.



II. MARCO TEORICO

2.1 Antecedentes internacionales

Los autores Boussouga, y Lhassani (2017) Investigaron la retención de sales de NaCl y Na₂SO₄ en las concentraciones (0,001 – 0,1M) utilizando membranas de nanofiltración comerciales de NF270 y NF90) y BW30LE a tres presiones aplicadas. Los resultados se indican en la siguiente tabla

Tabla 1 : Porcentaje de Retención de NaCl y NaSO₄

Tipo de sal	Tipo de membrana	0,001 M		0,1M	
		5 Bar	15 Bar	5 Bar	15 Bar
NaCl	NF270	30	48	13	18
	NF90	34	69	25	59
	BW30LE	76	90	64	82
Na ₂ SO ₄	NF270	91	96	88	94
	NF90	93	98	91	95
	BW30LE	94	99	91	96

El autor Abuhabib (2013). En la experimentación utilizaron membranas comerciales de tipo NF-1 y ASP30 mostraron un mayor rechazo de la sal de MgSO₄ divalente que sales monovalentes de NaCl. Frente a la presión (2- 10 bar). La membrana comercial NF-1 mostro el mayor rechazo de MgSO₄ (casi 92 %), pero un rechazo ligeramente menor de NaCl (por debajo del 45%). Las membranas comerciales ASP30 mostraron un rechazo de 35 % de MgSO₄ y 35% para NaCl .

Los autores Hilal, Zoubi, y Darwish, (2007).desarrollaron una investigation cuyo título es Performance of nanofiltration Membranes in the Treatment of Synthetic and Real Seawater

En su investigación utilizaron membranas comerciales de tipo NF90 y NF270 para filtrar diferentes mezclas incluido el agua de mar real y sintética a niveles de salinidad representativos del agua de mar y presión en el rango de 4 a 9 bares. Los resultados mostraron que el rechazo aumenta con la presión de NF90 y aumenta ligeramente con la presión de NF270. Se descubrió que la membrana anterior era capaz de rechazar tanto monovalente y divalente de todas las mezclas investigadas y agua de mar con valores razonables pero con un flujo relativamente bajo. Además, redujo la salinidad de los investigados de agua de mar de 38 a 25,5 g /L usando una etapa de membrana NF a 9 bar.

Esta hace NF90 adecuado para la aplicación en el tratamiento previo de la desalinización procesos y en aplicaciones de desmineralización parcial. Por otra parte, NF270 puede rechazar iones monovalentes a valores relativamente bajos e iones divalentes a valores razonables y redujo la salinidad del agua de mar a 33,6 g / L, pero a muy alto flujo de permeado.

2.2 Base Teórica

El tema de investigación propuesto está enmarcado en la teoría de desalinización, membranas. Así mismo, en la evaluación de los indicadores de desalinización basados en la ley de la conservación de la materia.

2.2.1 Teórico

1. Desalinización

Medina (2000) menciona que la desalinización consiste en un proceso de separación de sales disueltas de aguas salobres o de mar para convertirlas en aguas adecuadas para consumo humano, industrial o de riego. En la tabla siguiente se encuentran los principales procesos de desalinización.



Tabla 2: Procesos de Desalinización

Térmica	Evaporación	Destilación Flash Destilación Multi efecto
	Cristalización	Congelación
	Filtración y evaporación	Destilación con membranas
Mecánica	Filtración	Osmosis inversa Nanofiltración
Eléctrica	Filtración Selectiva	Electrodialisis

La calidad del agua varía de acuerdo con la región y el tipo de subsuelo. El grado de salinidad del agua está determinado por la cantidad de Sólidos Disueltos Totales (SDT) que contiene, y se expresa en miligramos de sales por litro de solución (partes por millón). En la siguiente tabla se indican los diferentes tipos de agua.

Tabla 3: Salinidad de Diferentes Tipo de Agua

Tipo de agua	Sólidos Totales (ppm)
Ultra pura	0,03
Pura	0,3
Desionizada	3
Dulce	< 1 000
Salobre	1 000 – 10 000
Salina	10 000 – 30 000

2. Clasificaciones de membrana

Las tres membranas predominantes utilizadas en la industria son Osmosis Inversa (RO), Ultrafiltración (UF), Microfiltración (MF). En ciertos casos especializados se usa Nanofiltración (NF).



a. Microfiltración (MF)

El tamaño de poro en las membranas de microfiltración varía de 0,1 - 5 μm , y tiene el tamaño de poro más grande de los cuatro tipos de membrana. Sus poros son lo suficientemente grandes como para filtrar bacterias, glóbulos, harina, talco y muchos otros tipos de polvo fino en solución. Debido a que sus poros son relativamente grandes en comparación con otras membranas, puede operarse a bajas presiones y, por lo tanto, con poca energía.

b. Ultrafiltración (UF)

La ultrafiltración tiene un rango de tamaño de poro de 0,1 μm a 0,01 μm . Las membranas de UF rechazan partículas tales como sílice, virus, proteínas, y materiales en suspensión. Debido a la disminución del tamaño de poro, la presión osmótica requerida es mayor que la de MF.

c. Nanofiltración (NF)

La nanofiltración tiene un rango de tamaño de poro de 0,001-0,01 μm . Las membranas NF pueden separar iones polivalentes de los monovalentes y azúcares, sin embargo, no pueden eliminar la mayoría de las sales acuosas y los iones metálicos, como tales, NF generalmente se limita a usos especializados.

d. Ósmosis inversa (RO)

La ósmosis inversa tiene un rango de tamaño de poro de 0,0001 a 0,001. es, de lejos, el mejor material de separación disponible para la industria. Se usa a gran escala para la desalinización y purificación de agua, ya que filtra todo, excepto las moléculas de agua, con tamaños de poro que se aproximan al radio de algunos átomos en muchos casos. Este tamaño de poro significa que es la única membrana que puede filtrar con fiabilidad la sal y los iones metálicos del agua. El tamaño de poro pequeño de las membranas de OI significa que se requiere una cantidad significativa de presión osmótica para forzar la filtración.



3. Nofiltración (NF)

La nanofiltración (NF) es un proceso de separación por membrana, reconocido por primera vez a fines de la década de 1980, cuyo rendimiento es intermedio entre el de la ósmosis inversa (RO) y la ultrafiltración (UF), con un tamaño de poro en el orden de un nanómetro y su correspondiente peso molecular de 300 - 500 Da.

Las membranas en general actúan como barreras permeables selectivas que permiten que algunas sustancias (como el agua) permee a través de ellas mientras retiene otras sustancias disueltas (como iones). como se muestra en la figura N° 1

La nanofiltración (NF) representa un desarrollo relativamente reciente en tecnología de membranas con características que se encuentran entre la ultrafiltración (UF) y la ósmosis inversa (RO). Las membranas NF capaces de separación de iones y solutos sin carga, representan un proceso de membrana único, preferentemente separa iones multivalentes de los monovalentes. La nanofiltración es una técnica de separación por membrana diseñada inicialmente para la eliminación de iones divalentes como el calcio, el magnesio o el sulfato, con objeto de descalcificar el agua, y recibió en su origen el nombre de softening membranes (Beardsley et al., 1995)

Mientras que las membranas de OI dominan la industria de desalinización de agua de mar, NF se empleara en un futuro cercano en una variedad de aplicaciones industriales y de tratamiento de agua para la eliminación selectiva de iones y sustancias orgánicas, y también incluye ciertas aplicaciones de desalinización de agua de mar y salobre.

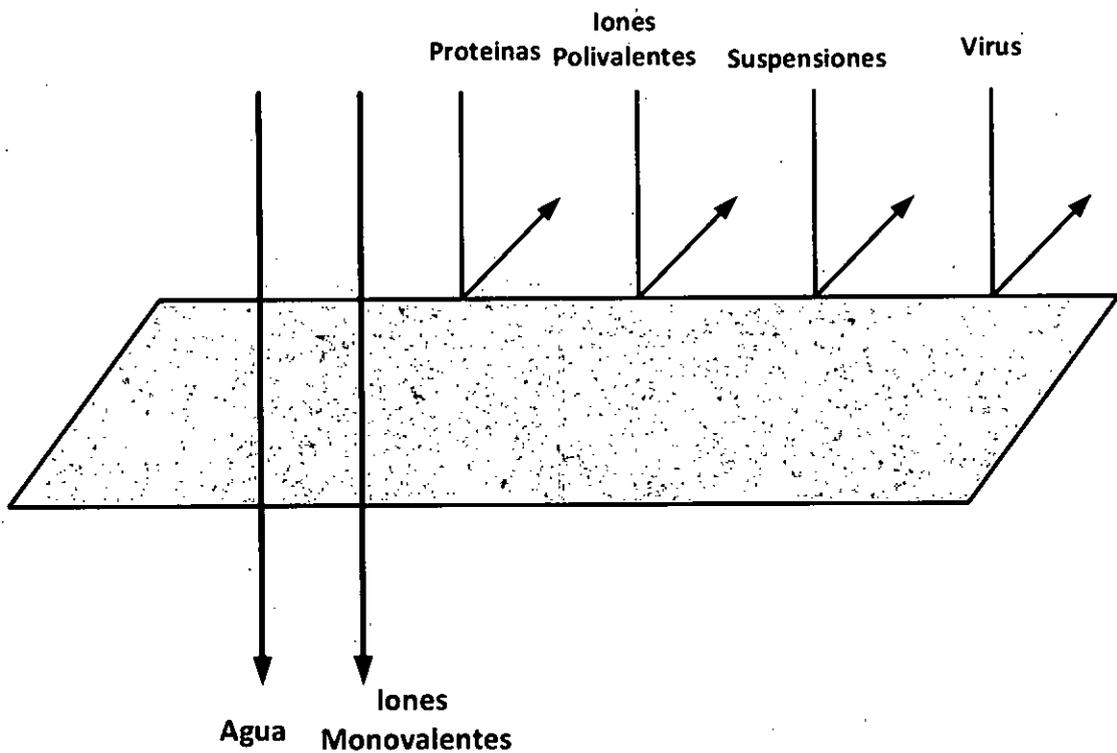


Figura 1: Esquema de una membrana de nanofiltración

Posibles usos de la NF:

- Ablandamiento del agua salobre debido a la selectividad de iones.
- Retención de compuestos orgánicos tras la permeación de sales monovalentes.
- Separación de ingredientes de menor y mayor peso molecular en soluciones acuosas.

4. Esquema general de un sistema de membranas

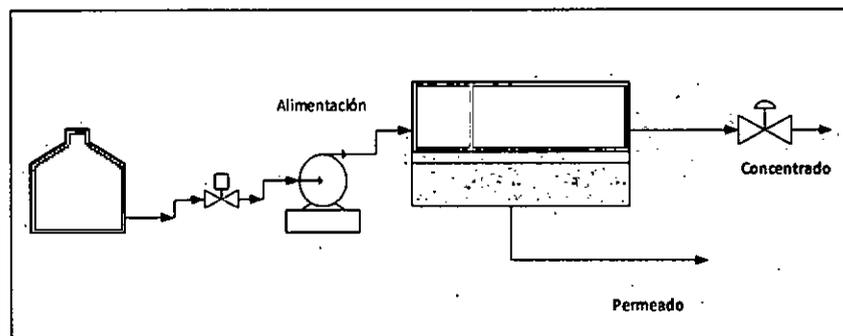


Figura 2: Esquema de un Sistema de Desalinización

5. Factores que afectan a la membrana de nanofiltración

El flujo de permeado y el rechazo de sal son los parámetros clave de rendimiento de una ósmosis inversa o un proceso de nanofiltración. Bajo condiciones de referencia específicas, el flujo y el rechazo son Propiedades intrínsecas del rendimiento de la membrana. El flujo y rechazo de un sistema de membrana. Están influenciados principalmente por parámetros variables que incluyen:

- Presión

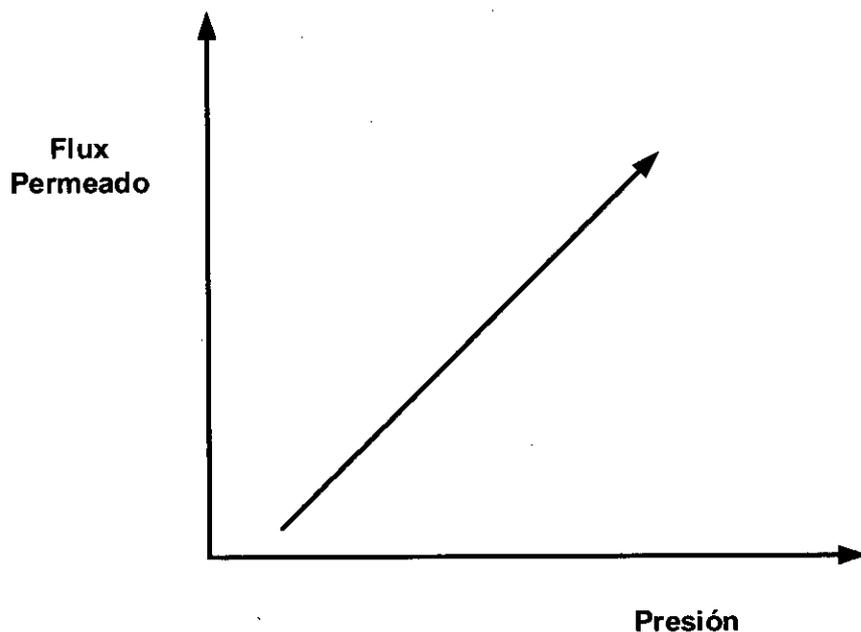


Figura 3: Presión vs flux permeado

2.2.2. Conceptual

1. Porcentaje de recuperación

El flujo de permeado o productividad es un parámetro importante en el diseño y la viabilidad económica de los procesos de separación con membranas. Cada membrana tiene un valor específico de permeabilidad para un valor dado de presión, temperatura y salinidad del agua de alimentación. De acuerdo con el balance de masa, la alimentación de flujo igual a la suma del flujo de concentrado y el flujo de permeado. El porcentaje de recuperación es calculado usando la ecuación (Boussouga).

$$\gamma = \frac{Q_p}{Q_f} \times 100\% = \frac{Q_p}{Q_p + Q_r} \times 100\%$$

γ : porcentaje de recuperación, Q_p : Flujo de permeado (L/h), Q_f : Flujo de alimentación (L/h), Q_r : flujo de rechazo (L/h)

2. Porcentaje de rechazo

El segundo indicador de un sistema de separación con membranas es el porcentaje de rechazo, representa la capacidad de la membrana para rechazar sales e impurezas de agua de alimentación. La capacidad de la membrana para rechazar los TDS se medirá (Boussouga) usando la siguiente ecuación. Este parámetro es necesario para ser considerado durante la selección de membrana.

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

Dónde:

R: Tasa de rechazo%, C_p : Concentración de sal en permeado (ppm).

C_f : Concentración de sal en el agua de alimentación (ppm).

3. Balance de masa

El balance de masa en estado estacionario de los sistemas de separación con membrana, se determina mediante la ecuación

$$C_f Q_f = C_p Q_p + C_r Q_r$$

C_f : Concentración de alimentación, mg/L o mol/L Q_f = caudal de alimentación, m³ /día

La conservación de la masa mediante la ecuación (2)

$$C_f Q_f = C_p Q_p + C_r Q_r$$

Q_p :caudal de permeado o caudal agua producto, m³ /día, C_r Q_r = caudal de rechazo o salmuera, m³ /día

4. El flux de permeado

El transporte de agua a través de la membrana es expresado como un flux de permeado, se define como el caudal volumétrico de agua a través de un área de membrana dada. En el caso de NF, la unidad de flujo se expresa como litros de agua por metro cuadrado de área de membrana por hora (LMH) o galones por pie cuadrado por día (GFD). El flujo de permeado es proporcional a la presión esto se puede ver en la siguiente ecuación.

$$J_p = \frac{Q_p}{A\Delta t}$$

J_p : Flux permeado, L/m²s, Q_p : Flujo de permeado, m³ /h, A : Área de la membrana, m²

5. Presión transmembrana (TMP)

La presión transmembrana fue calculado mediante la ecuación

$$TMP = \frac{P_f - P_c}{2} - P_p$$

Donde: P_p es la presión de salida de la corriente de permeado ($P_p = 0$), TMP es el promedio aritmético de la alimentación y la presión del producto retenido.

6. Relación entre conductividad y solidos totales disueltos en diferentes tipos de agua.

$$STD = k CE$$

Donde: STD: solidos totales disueltos (mg/L) CE : conductividad eléctrica

$$\left(\frac{\mu S}{cm}\right) \text{ a } 25^\circ C$$

Tabla 4: Relación conductividad vs solidos totales disueltos

Solución	Conductividad	k
Agua permeada	0 - 300	0,5
Agua salobre	300 -20 000	0,55
Agua de mar	20 000 - 60 000	0,67
Concentrado de mar	60 00- 80 000	0,75

2.2.3. Teórico – conceptual

Con el objetivo de alcanzar un mayor rendimiento, las membranas pueden tomar diferentes configuraciones desde una simple etapa hasta varias etapas e incluyendo reciclo de las corrientes de concentrado.

1. Sistema simple de nanofiltración

Está diseñado para el funcionamiento continuo y las condiciones de operación son constantes con el tiempo. En la figura se ilustra un sistema simple de nanofiltración. El flujo de alimentación se divide en dos corrientes permeado y concentrado.

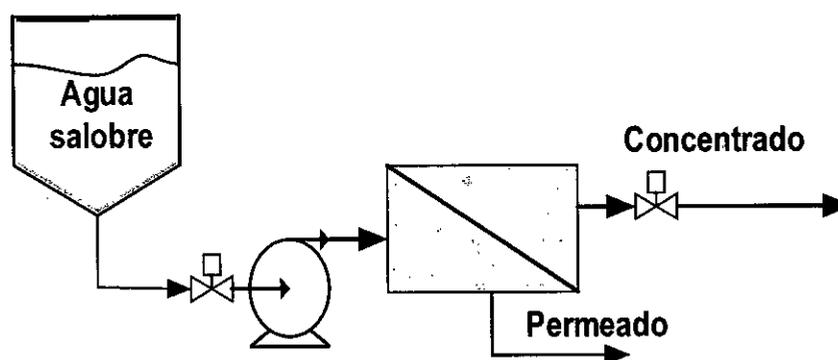


Figura 4: Esquema de un Sistema de Desalinización Simple

2. Sistema simple de nanofiltración con recirculación

En un solo módulo de un sistema de nanofiltración, la tasa de recuperación aproximadamente es de 50%. Para aumentar la tasa de recuperación, se lleva a cabo la recirculación del concentrado. En esta parte de la configuración del sistema concentrado se recicla y es añadido al tanque de alimentación como se muestra en la figura

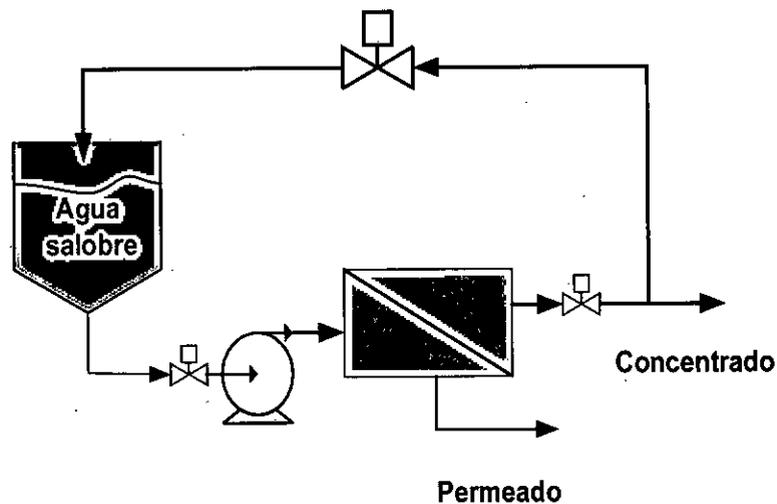


Figura 5: Esquema de un Sistema de desalinización simple con reciclo

2.3. Definición de Términos Básicos

1. Agua salobre

Agua que contiene sales en una proporción significativamente menor que el agua de mar. La concentración total de sales disueltas está generalmente comprendida entre 1 000 -10 000 mg/L

2. Desalinización

La desalinización es el proceso por medio del cual se separan las sales disueltas en el agua de mar o en aguas salobres, a fin de obtener agua dulce apta para el consumo de los seres vivos, agrícolas y procesos industriales

3. Diseño experimentos:

Es una técnica estadística que permite identificar y cuantificar las causas de un efecto dentro de un estudio experimental.

4. Rechazo o Concentrado

Corriente que contiene los componentes generalmente sales que no atraviesan la membrana.

5. Permeado

Corriente que contiene, fundamentalmente, los componentes de una disolución que salen de una membrana.

III. HIPOTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis general y específica

3.1.1 Hipótesis general

Con la evaluación de los factores de operación en forma adecuada en la desalinización de agua salobre mediante membranas de nanofiltración, obtendremos agua potable de acuerdo a las normas nacionales.

3.1.2 Hipótesis específica

1. Al Caracterizar los parámetros físico químicos del agua salobre e procedentes se espera conocer la composición química (iones calcio, magnesio, sulfatos y turbidez etc.)
2. Al seleccionar en forma adecuada los parámetros de operación (presión, conductividad, temperatura de operación, concentración de del agua salobre) del módulo de nanofiltración se logrará alcanzar altos valores de porcentaje de desalinización.
3. Al caracterizar los parámetros físico químicos de las corrientes de rechazo y permeado se logrará conocer la composición de los iones presentes

3.2 Variables

3.2.1 Definición conceptual

A) Variable dependiente

Factores de operación de la membrana de nanofiltración

1. Presión de operación : X₁
2. Concentración de agua salobre : X₂
3. Flujo de alimentación : X₃

b) Variable dependiente

Es la respuesta obtenida al variar las variables dependientes

- Porcentaje de desalinización : y₁
Factor de recuperación de flujo : y₂

Tabla 5: Matriz de Experimentos

Nº	Variables Independientes	Notación	Nivel 1	Nivel 2
1	Presión de alimentación	X ₁	0	1
2	Concentración de agua salobre	X ₂	0	1
3	Temperatura	X ₃	0	1

Las variables independientes seleccionadas y niveles se muestran en la tabla N° 5

3.2.2 Operacionalización de las variables

Tabla 6: Operacionalización de las Variables Independientes

Nº	Variable Independiente	Dimensión	Indicadores	Instrumento
1	Presión de operación	Presión de operación en la corriente de alimentación y rechazo	Lectura directa en psi	manómetro
2	Conductividad	Conductividad en la corriente de alimentación, permeado y rechazo	ms/cm	conductímetros
3	Temperatura	Temperatura de alimentación del agua salobre	°C	Termómetro

Tabla 7: Operacionalización de las Variables Dependientes

N°	Variable dependiente	Dimensión	Indicadores	Instrumento
1	Porcentaje de desalinización	Valor obtenido en la corriente de permeado	mg/L , us/cm %	Conductímetro y ecuaciones
2	Flux de permeado	Valor obtenido en la corriente de permeado	L/m ² h	ecuaciones
3	Porcentaje de recuperación de flujo	Valor obtenido en la corriente de permeado	%	Ecuaciones



IV. DISEÑO METODOLOGICO

4.1 Tipo y diseño de la investigación

4.1.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación que se ha utilizado en el presente estudio es experimental, pues se encarga de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de causa - efecto.

El enfoque se hace sobre las variables de operación y el porcentaje de desalinización, se demostrará la relación existente entre estas variables, buscando explicar el comportamiento de este fenómeno

4.1.2. Diseño de la investigación

El diseño de investigación es de tipo experimental, es investigar la influencia de los factores como la presión, concentración de alimentación y temperatura con respecto al porcentaje de desalinización.

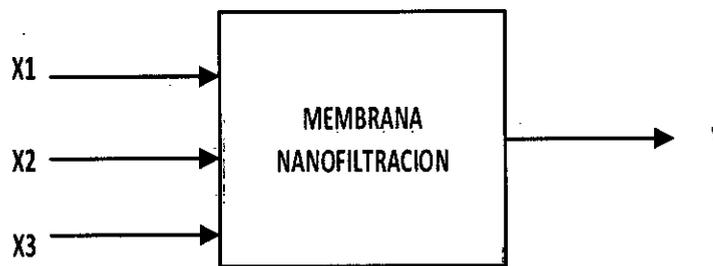


Figura 6 : Diagrama general de proceso

X1. Presión de operación

X2: conductividad de alimentación

X3 : temperatura

Y: % de desalinización

Las etapas del experimento se desarrollaron de la siguiente manera.

Fase 1: Construcción y puesta en marcha del módulo de nanofiltración

Fase 2: selección de los parámetros y niveles de operación.

Fase 3: caracterización físico química del agua subterránea

Fase 4: caracterización físico química de las corrientes de alimentación, permeado y rechazo.

4.1.3. Diseño factorial

En la siguiente tabla se indica los factores y niveles en estudio en de la desalinización mediante el módulo de nanofiltración.

Tabla 8: Parámetros de operación y niveles en estudio

Variables de proceso	Factor	Niveles	
Presión(psi)	X1	60	100
Conductividad(ms)	X2	3000	6000
Temperatura(°C)	X3	20	28

4.1.4 Matriz de diseño experimental

El diseño experimental utilizado es diseño factorial a dos niveles con tres factores, de la combinación de los factores y niveles resulta 8 experimentos que se muestra en al siguiente tabla.

Tabla 9: Matriz de Experimentación

N°	X ₁	X ₂	X ₃	Presión (psi)	Conductividad de alimentación ($ms\ cm^{-1}$)	Temperatura (°C)
1	-	-	-	60	2,71	20
2	+	-	-	100	2,71	20
3	-	+	-	60	5,01	20
4	+	+	-	100	5,01	20
5	-	-	+	60	2,71	28
6	+	-	+	100	2,71	28
7	-	+	+	60	5,01	28
8	+	+	+	100	5,01	28

4.2 Método de investigación.

Haciendo uso de la manipulación de una o más variables se mide su efecto sobre la variable dependiente o respuesta, cuyos resultados se analizarán y formularán conclusiones y recomendaciones para su uso de esta nueva tecnología para desalinización de agua salobre.

4.3 Población y muestra

4.3.1 Población

La población utilizada es agua subterránea, pozo de 15m de profundidad y un diámetro de 1,05 m ubicado en el distrito de Lurín.

4.3.2 Muestra

La muestra para cada experiencia fue de 80 litros, está en función de la capacidad del equipo experimental.

4.4 Lugar de estudio

Universidad Nacional del Callao, Laboratorio de operaciones y procesos unitarios

4.5 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

4.5.1 Técnicas analíticas

Se realizaron análisis químico mediante titulación volumétrica con EDTA para determinar la dureza total de las corrientes de alimentación, permeado y rechazo.

Se determino la conductividad insitu del agua subterránea y de las corrientes de proceso mediante el equipo.

Los sólidos totales disueltos de las corrientes de proceso se han medido mediante el equipo. La medida de turbidez se ha llevado a cabo mediante el turbidímetro.

La concentración de iones calcio, magnesio, sodio, sulfato, cloruros, nitratos y dióxido de silicio se analizó mediante el equipo instrumental.

4.5.2 Medida de parámetros de proceso

La lectura de presión en las corrientes de alimentación y rechazo fueron de lectura directa a través de manómetros de escala de 0 a 150 psi.

Las lecturas de flujo volumétrico de permeado y rechazo fue a través lectura directa mediante rotámetros instalados en el equipo experimental.

4.5.3 Equipo experimental

El módulo experimental contiene una membrana de nanofiltración de dimensiones de 2540 pulgadas marca voltron fabricado del país china , para su funcionamiento ha sido incorporado una bomba de alta presión y una válvula instalada en la corriente de concentrado que permite el control de flujo de permeado crea la contrapresión necesaria para el forzando del fluido a través de la membrana, y abriendo o cerrando esta válvula, la presión y la velocidad de flujo de permeado se ajusta a través de esta válvula.

El módulo de nanofiltración está incorporado manómetros y flujómetros para lectura directa de los parámetros estudiados.

Para almacenar el agua salobre de alimentación se instaló un tanque de 120 litros de capacidad, las corrientes de permeado y rechazo se recogieron en tanques de 20 litros de capacidad, tres válvulas de paso para controlar los flujos de alimentación, rechazo y regular la alimentación.

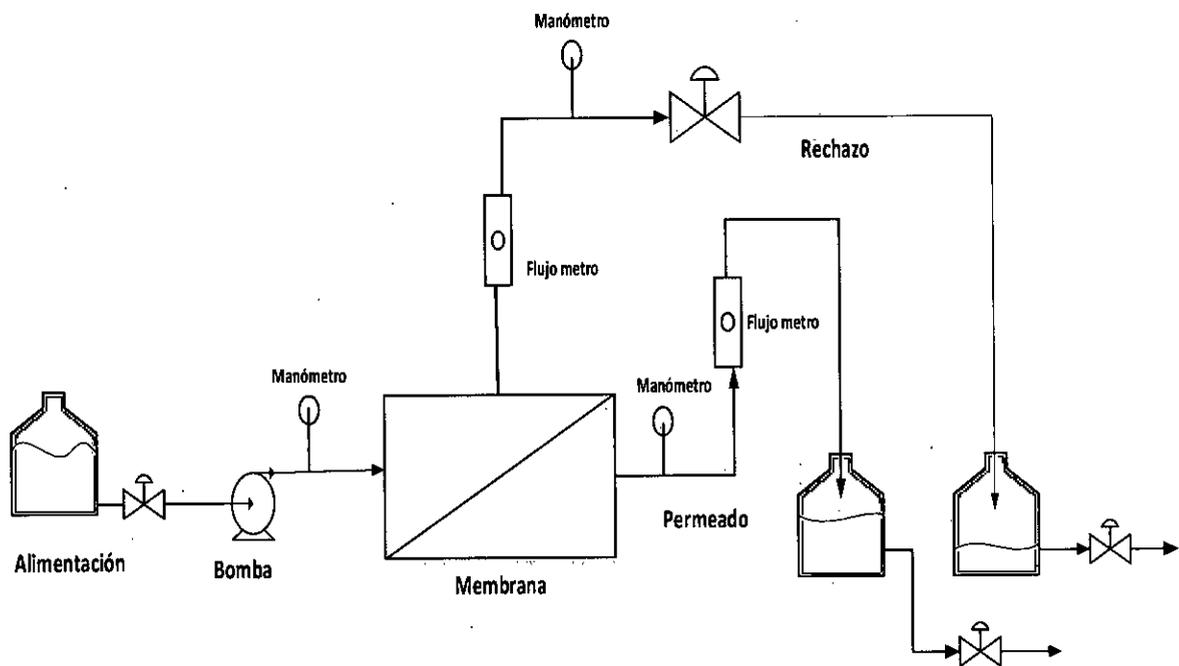


Figura 7: Esquema del equipo experimental de nanofiltración

4.5.4 Método

La investigación se realizó en el equipo de nanofiltración de modo batch, se ha variado la presión de concentrado para ver su efecto con respecto al flujo de permeado y rechazo así mismo la influencia a la conductividad de ambas corrientes de proceso.

La lectura de presión se ha medido a través de manómetros incorporados al sistema y el flujo de permeado y rechazo a través de rotámetros. La

conductividad se ha medido en la alimentación y las corrientes de permeado y rechazo para cada solución preparada

4.6 Análisis y procedimientos de datos

El análisis de los resultados experimentales, se ha efectuado mediante el software Excel y mediante el software Minitab.

Mediante su aplicación se realizará una serie de tablas, gráficas y análisis para determinar los factores más influyentes de los parámetros de operación del equipo de nanofiltración frente a la desalinización del agua salobre (y).

V. RESULTADOS

5.1 Caracterización físico química del agua subterránea

La caracterización del agua subterránea se llevó a cabo horas antes de la experimentación con el módulo de nanofiltración y se obtuvieron los siguientes resultados como se indica en la

Tabla 10: Análisis de calidad de agua subterránea

Parámetros	Valores
Conductividad	5,01 $ms\ cm^{-1}$
pH	7,3
Turbidez	0,28 NTU
STD (mg/L)	2665
Dureza total	11,2 ml (889,75)
Ca^{2+} (mg/L)	386,6
Mg^{2+} (mg/L)	99,7
Na^{1+} (mg/L)	554,3
Cl^{1-} (mg/L)	1307,62
SO_4^{2-} (mg/L)	469,59
NO_3^{1-} (mg/L)	137,92
SiO_2 (mg/L)	



5.2 Resultados del diseño experimental

5.2.1 Porcentaje de desalinización respecto a los parámetros de operación.

En la siguiente tabla se indica los resultados de la conductividad de la corriente de permeado y rechazo de acuerdo a los parámetros de operación de estudio, igual forma se indica el porcentaje de desalinización para cada experiencia efectuada

Tabla 11: Porcentaje de desalinización vs parámetros de operación

N°	Presión (psi)	Conductividad alimentación	Temperatura (°C)	Conductividad permeado	Conductividad rechazo	% de desalinización
1	60	3,4	20	2,44	4,62	28,2
2	100	3,4	20	2,60	5,07	23,5
3	60	6,01	20	4,7	7,21	21,7
4	100	6,01	20	4,18	7,22	30,4
5	60	3,4	28	2,52	4,25	25,8
6	100	3,4	28	2,32	5,13	31,7
7	60	6,01	28	4,62	7,04	23,1
8	100	6,01	28	4,35	7,3	27,6

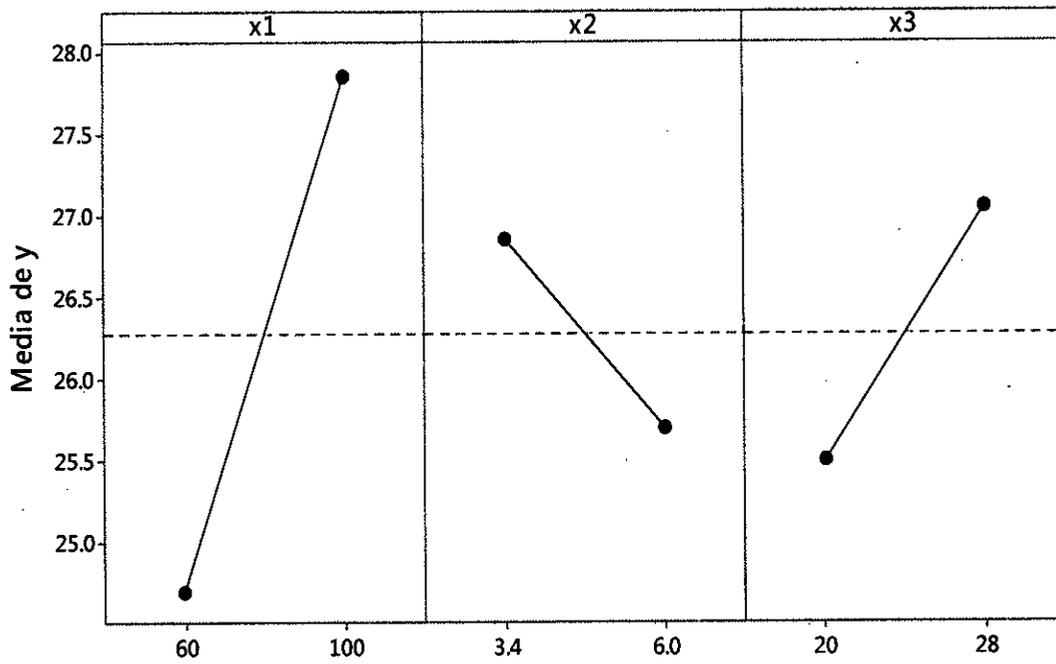


Figura 8: Efectos principales para medias

Fuente: Obtenido a partir del software MINITAB 18

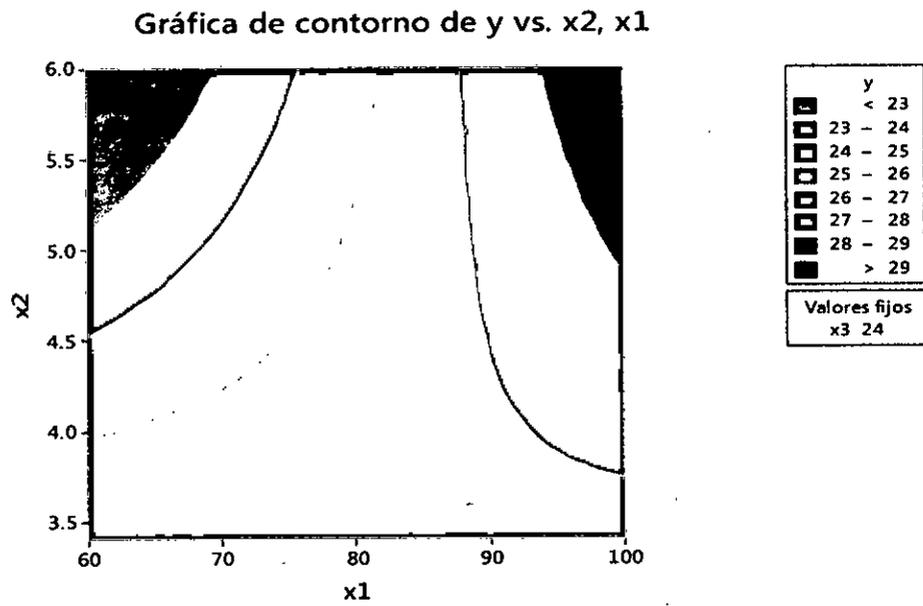


Figura 9: Porcentaje de desalinización vs presión y conductividad

Fuente: Obtenido a partir del software MINITAB 18

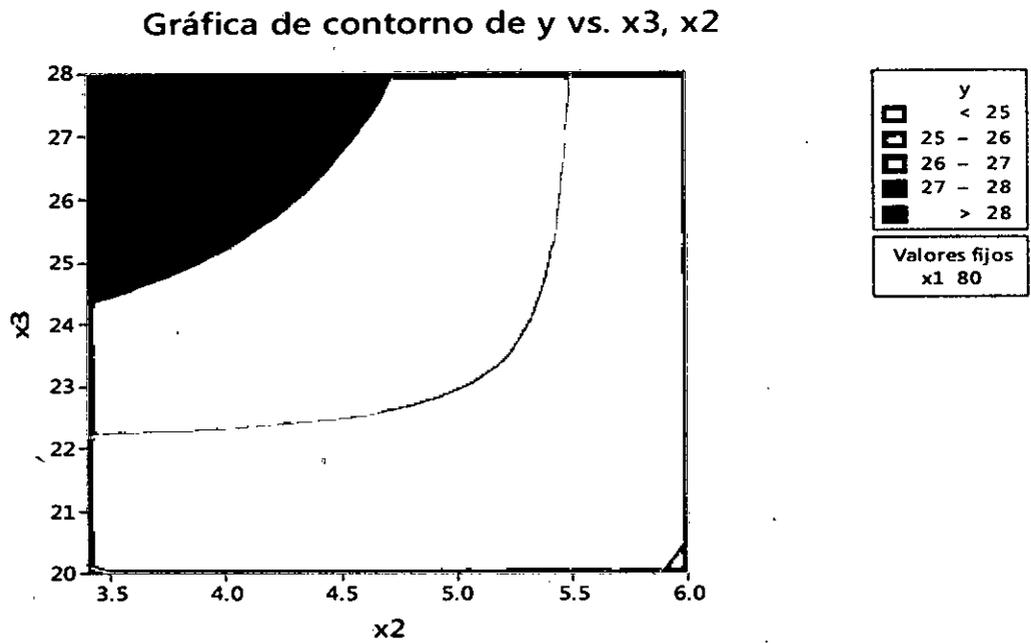


Figura 10: Porcentaje de desalinización vs conductividad y temperatura.

Fuente: Obtenido a partir del software MINITAB 18

Gráfica de contorno de y vs. x3, x1 .

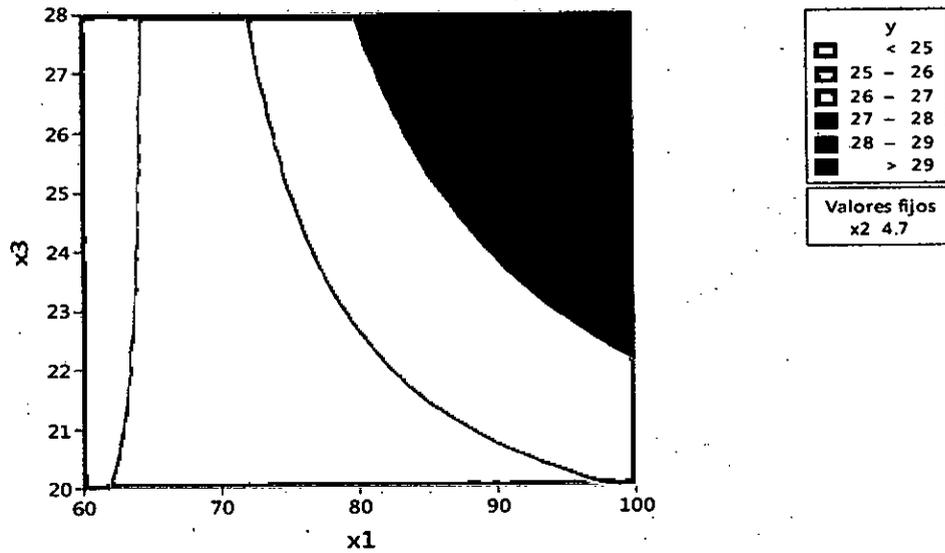


Figura 11: Porcentaje de desalinización vs Presión y temperatura

Fuente : Obtenido a partir del software MINITAB 18

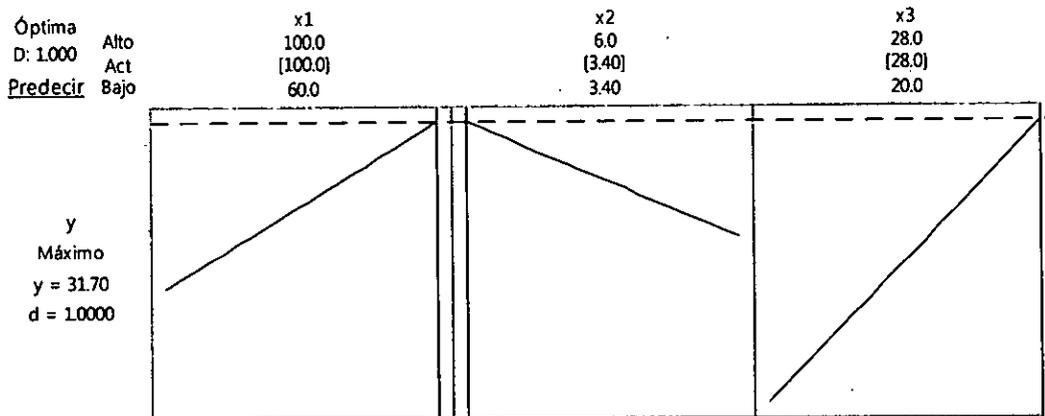


Figura 12: Grafica de optimización de los parámetros de operación

5.2.2 Porcentaje de recuperación de flujo respecto a los parámetros de operación

Tabla 12: Porcentaje de desalinización vs parámetros de operación

N°	Presión (psi)	Conductividad alimentación	Temperatura (°C)	Flujo permeado	Flujo rechazo	Flujo de alimentación	% de recuperación
1	60	3,4	20	4,5	6,3	10,7	42,05
2	100	3,4	20	7	3,5	10,5	66,6
3	60	6,01	20	3,6	7	10,6	33,9
4	100	6,01	20	6	4,6	10,6	56,6
5	60	3,4	28	5,5	5,3	10,8	50,9
6	100	3,4	28	9,5	1,5	11	86,3
7	60	6,01	28	4,5	6	10,5	42,8
8	100	6,01	28	7,5	3	10,5	72,8

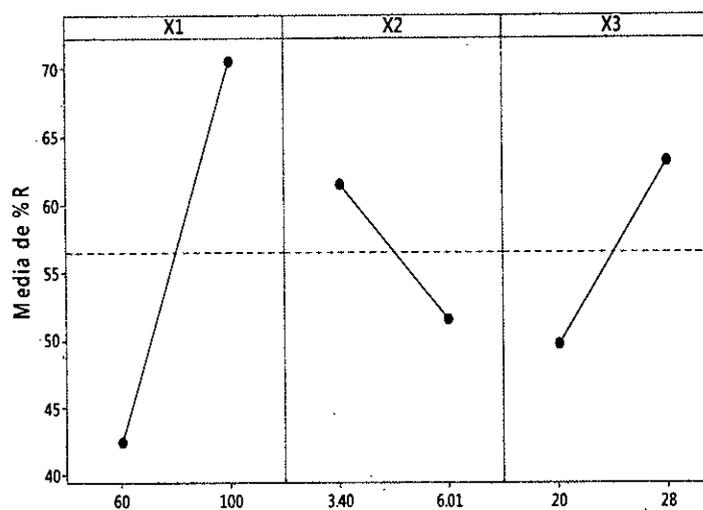


Figura 13: Efectos principales para medias de porcentaje de recuperación

5.2.3. Dureza total respecto a los parámetros de operación

Tabla 13: Porcentaje de desalinización vs parámetros de operación

N°	Presión (psi)	Conductividad alimentación	Temperatura (°C)	Dureza total permeado	Dureza total rechazo
1	60	3,4	20	5,8	14,1
2	100	3,4	20	3	13,8
3	60	6,01	20	5,4	17,6
4	100	6,01	20	3,8	17,6
5	60	3,4	28	4,7	11
6	100	3,4	28	3,5	14,1
7	60	6,01	28	5,9	18
8	100	6,01	28	6,1	19,1

5.2.4 Porcentaje de separación de solidos totales disueltos vs parámetros de operación.

Tabla 14: Porcentaje de desalinización vs parámetros de operación

N°	Presión (psi)	Conductividad alimentación	Temperatura (°C)	STD permeado	STD rechazo
1	60	3,4	20	1,77	2,66
2	100	3,4	20	1,17	2,48
3	60	6,01	20	2,35	3,52
4	100	6,01	20	1,9	3,61
5	60	3,4	28	1,35	2,02
6	100	3,4	28	1,19	2,46
7	60	6,01	28	2,21	3,54
8	100	6,01	28	2,13	3,71

5.3 Caracterización físico química del corriente de proceso

En la tabla 15 se muestra los resultados físico químicos del agua salobre proveniente de agua de pozo del distrito de Lurín, después del tratamiento mediante nanofiltración a las condiciones de operación de presión de 100 psi, concentración inicial de 3,4 ms/cm y temperatura de 28°C.

La conductividad fue ajustada adicionando agua desionizada de calidad de 5 ppm hasta alcanzar 2,7 ms/cm.

Tabla 15: Características físico químicas de agua de alimentación, permeado y rechazo al módulo de nanofiltración

Parámetros	Valores		
	Alimentación	Permeado	Rechazo
Conductividad	2,71 $ms\ cm^{-1}$	2,05	4,33
pH	7,8	7,8	7,8
Turbidez	0,31 NTU	0,12	0,24
STD (mg/L)	1,49	750	1920
Dureza total			
Ca^{2+} (mg/L)	243,9	123,9	516,2
Mg^{2+} (mg/L)	67,2	19,7	137
Na^{1+} (mg/L)	282,7	222,7	329,3
Cl^{1-} (mg/L)	639,65	584,29	820,82
SO_4^{2-} (mg/L)	381,46	58,06	325,59
NO_3^{1-} (mg/L)	69,85	37,59	79,54
SiO_2 (mg/L)	7,2	5,41	11,01

5.4 Resultados preliminares

Para poner el equipo operativo se ha efectuado pruebas preliminares utilizando agua salobre que proviene de concentrados de osmosis inversa y soluciones modelos que fueron preparados a partir de reactivos puros semejantes a aguas salobres, en la tabla 2 se indica los parámetros físico químicos del concentrado de osmosis inversa y en la tabla xx se muestra las características físico química del agua salobre de la solución modelo.

5.4.1 Concentrados de osmosis inversa

Tabla 16: Análisis de la calidad del agua salobre

Parámetro	Medida
Conductividad (us/cm)	1040
STD (mg/L)	470
pH	7,1
Temperatura	28,3

Tabla 17: Flujo vs presión

Presión alimentación (psi)	Flujo (gpm) Alimentación	Flujo permeado	Flujo Rechazo
40	2,8	0,8	2,0
50	2,8	1,0	1,8
60	2,8	1,25	1,55
80	2,8	1,6	1,2

Fuente: Elaboración propia

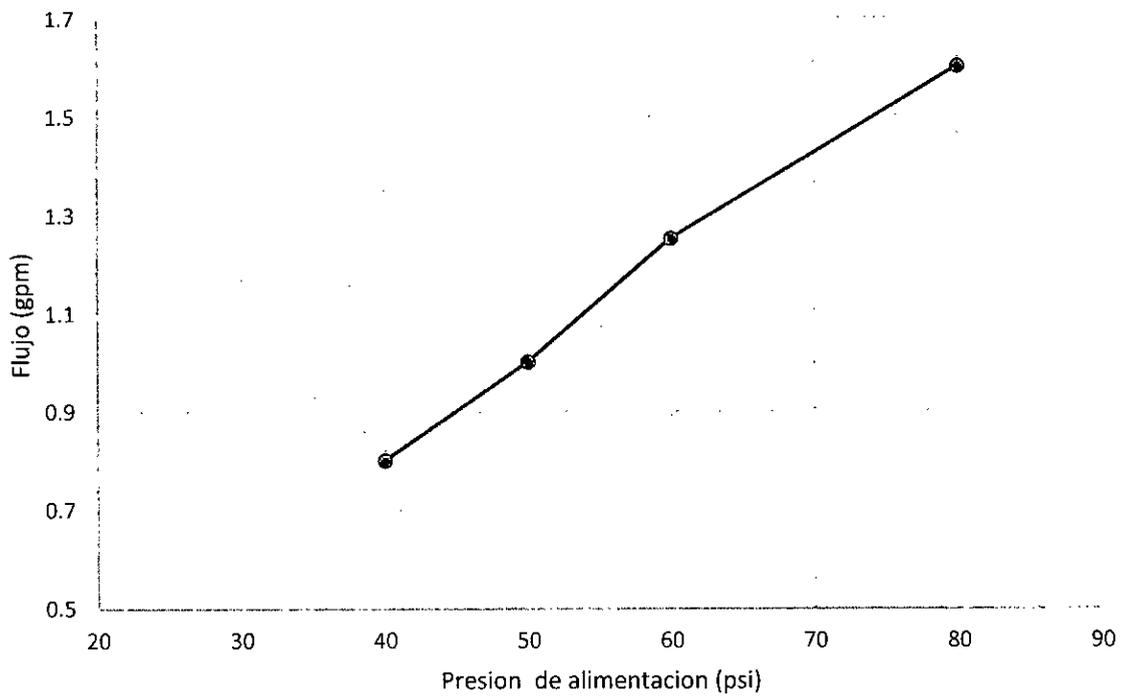


Figura 14: Flujo de permeado vs presión de alimentación

Fuente: Elaboración propia

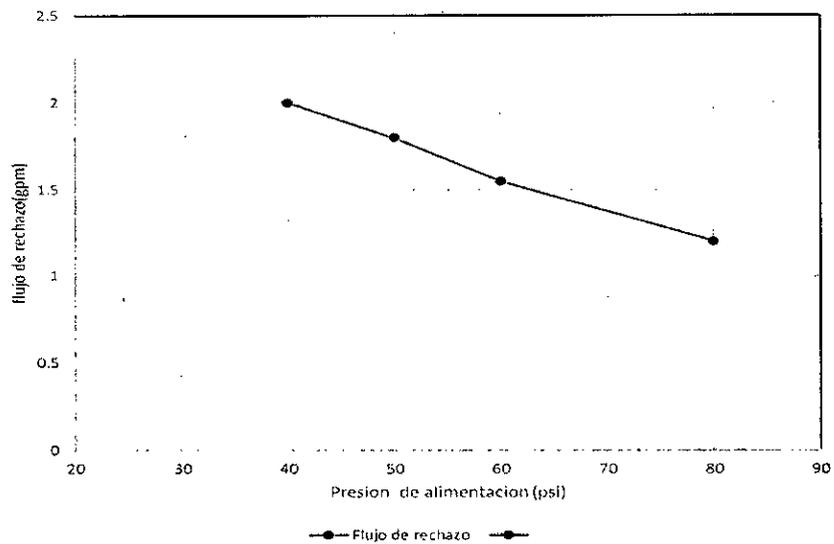


Figura 15: Flujo de rechazo vs presión de alimentación

Fuente: Elaboración propia

Tabla 18: Parámetros físico químicos permeado vs presión de alimentación

Parámetros	Flujo Permeado (gpm)			
	0,8	1	1,25	1,6
Físicos químicos				
Conductividad (us/cm)	608	480	444	543
STD (mg/L)	350	260	250	240
pH	7,2	7,02	7,03	7,04

Fuente: Elaboración propia

Haciendo uso de la ecuación N° 6 se determina el porcentaje de recuperación de flujo que se muestra en la tabla N°5

Tabla 19: Porcentaje de recuperación de flujo vs presión de alimentación

Presión alimentación(psi)	Porcentaje de recuperación(%R)
40	28,57 %
50	35,7%
60	44,6%
80	57,14%

Fuente: Elaboración propia

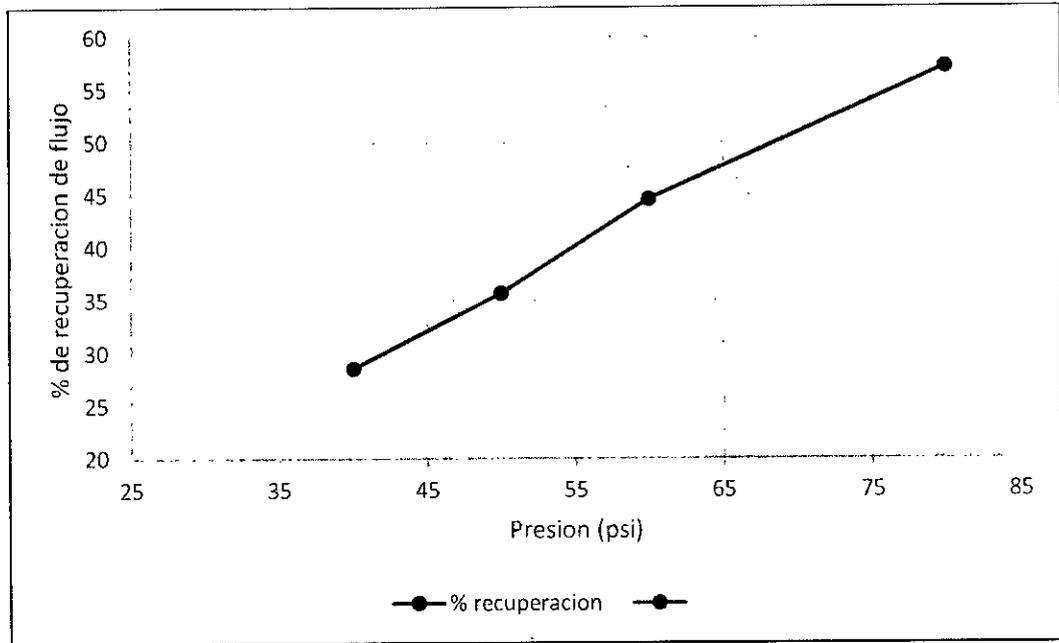


Figura 16: Porcentaje de recuperación de flujo vs presión

Fuente: Elaboración propia

Haciendo uso de la ecuación N° 3 se determina el porcentaje de separación de sales que se muestra en la tabla 6

Tabla 20: Porcentaje de separación de sales vs presión de alimentación

<i>Presión alimentación(psi)</i>	<i>Porcentaje de separación de (%S)</i>
40	41,53%
50	53,8%
60	57,3%
80	47,7%

Fuente: Elaboración propia

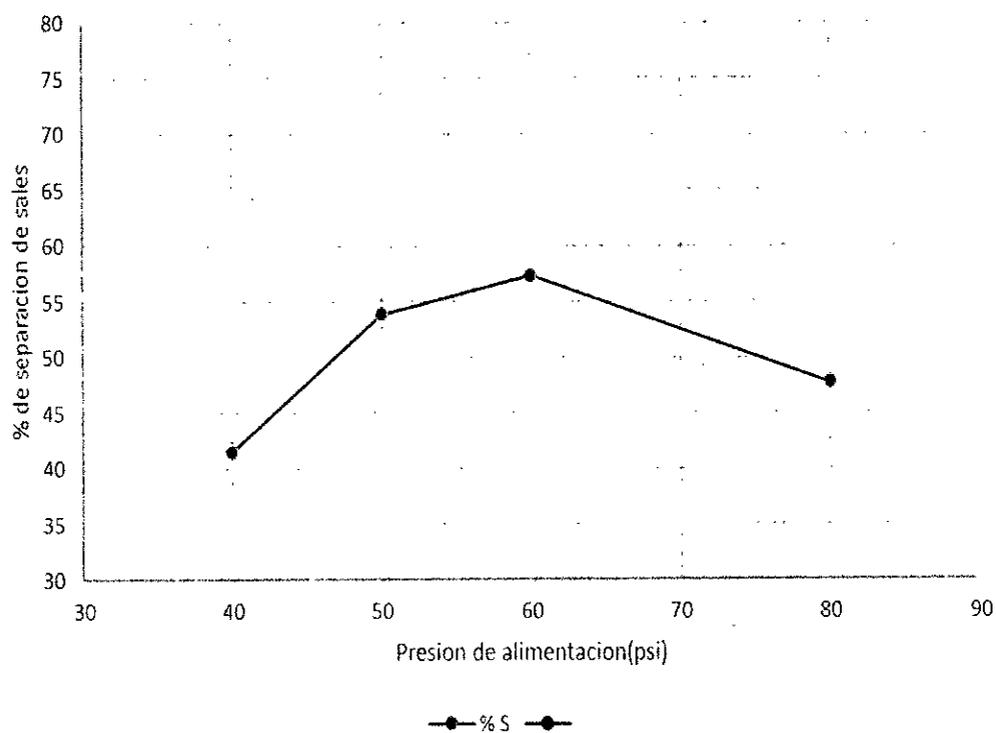


Figura 17 : Porcentaje de separación de sales vs presión

Fuente: Elaboración propia

5.1.2 Resultados a partir de soluciones modelos

La muestra fueron preparadas a partir de cloruro de sodio de grado analítico con agua desionizada un volumen de mezcla de 100 litros de contracciones de 1g de NaCl /L , 3 g de NaCl /L , 4 g de NaCl/L y 0,5g de CaCl₂ con 4 g de NaCl/L.

Tabla 21: Concentración de cloruro de sodio y conductividad

Concentración de alimentación de (g/L) NaCl	Conductividad (ms)
1	1,5
3	7,13
4	9,05

Tabla 22: Presión (psi) - Flujo (L/min)

Presión de alimentación (psi)	Rechazo (psi)	Flujo de rechazo	Flujo de permeado
38	33	8	2
68	60	7	4
78	74	6	5
98	95	4	6
107	104	3,5	6.5

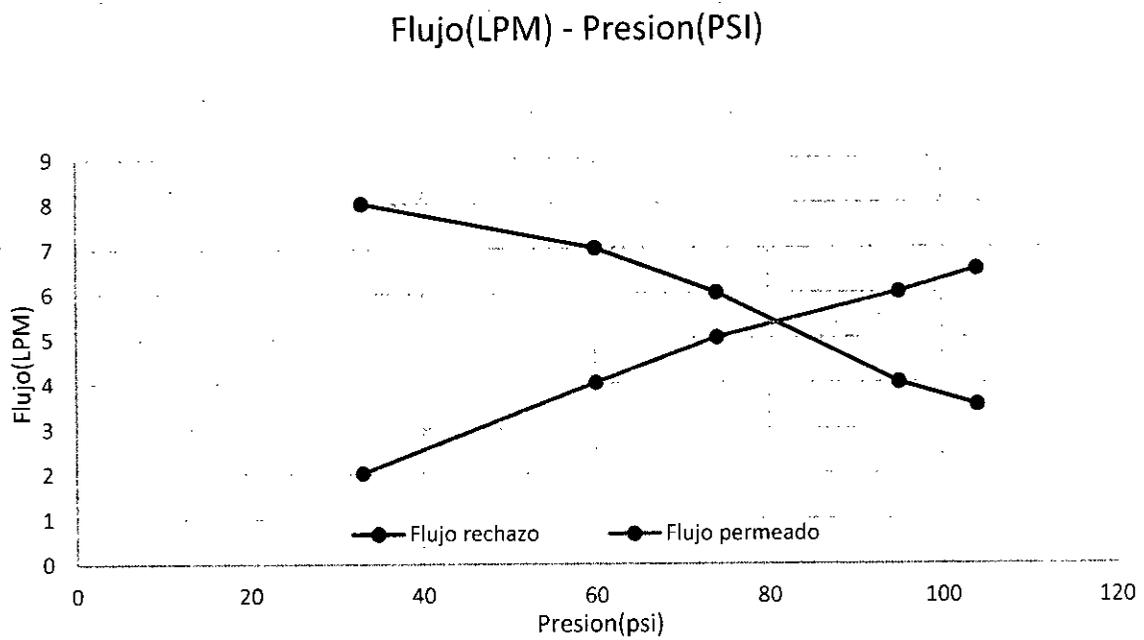


Figura 18: Flujo de permeado y rechazo vs presión

Tabla 23: Presión (psi) - flujo (L/min)

Presion de alimentacion (psi)	Rechazo (psi)	Flujo de rechazo	Flujo de permeado
62	60	7	3,5
68	66	6,5	4,0
78	76	6,3	4,5
87	85	6	5
98	96	5	5,5

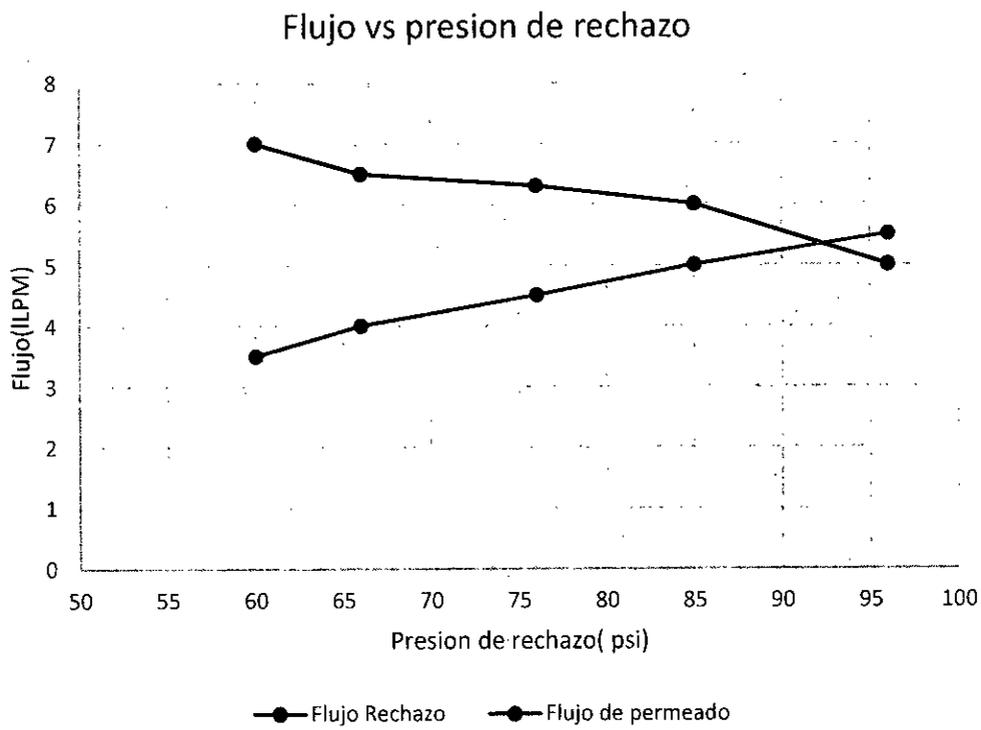


Figura 19: Flujo de rechazo y permeado con respecto a la presión de rechazo a la concentración de 3g/L de NaCl

Tabla 24: Presión (psi) vs flujo (L/min)

Presion de alimentacion (psi)	Rechazo (psi)	Flujo de rechazo	Flujo de permeado
64	62	7	3,5
74	71	6,5	4,0
84	77	6	4,5
94	91	5,5	5,0
100	97	5	5,5

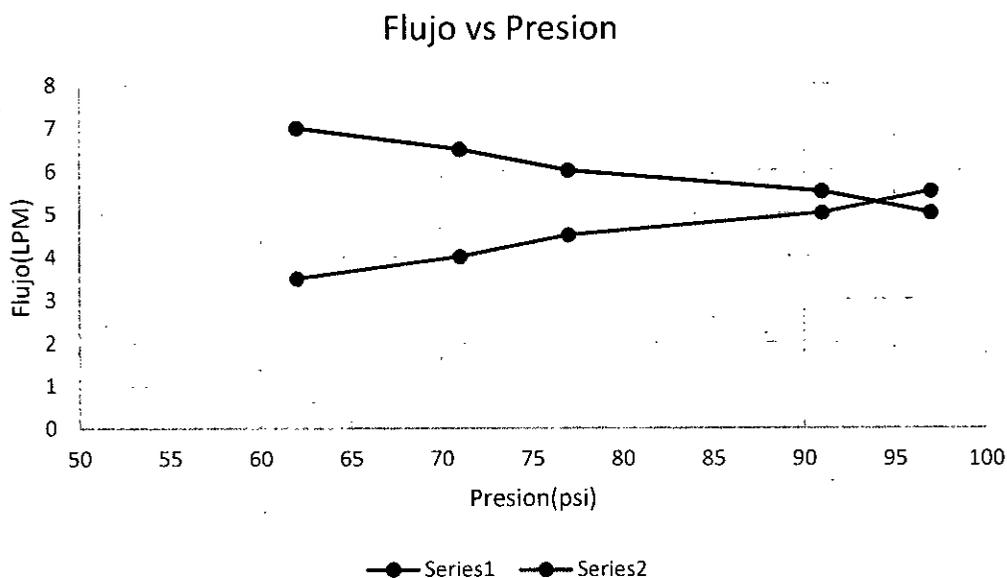


Figura 20: Flujo de rechazo y permeado con respecto a la presión de rechazo a la concentración de 4g/L de NaCl

Tabla 25: Presión (psi) – flujo (L/min)

Presion de alimentacion (psi)	Rechazo (psi)	Flujo de rechazo	Flujo de permeado
72	67	7	4
86	82	5,5	4,5
94	91	6	5
98	94	5,5	5,0
100	98	5	5,5

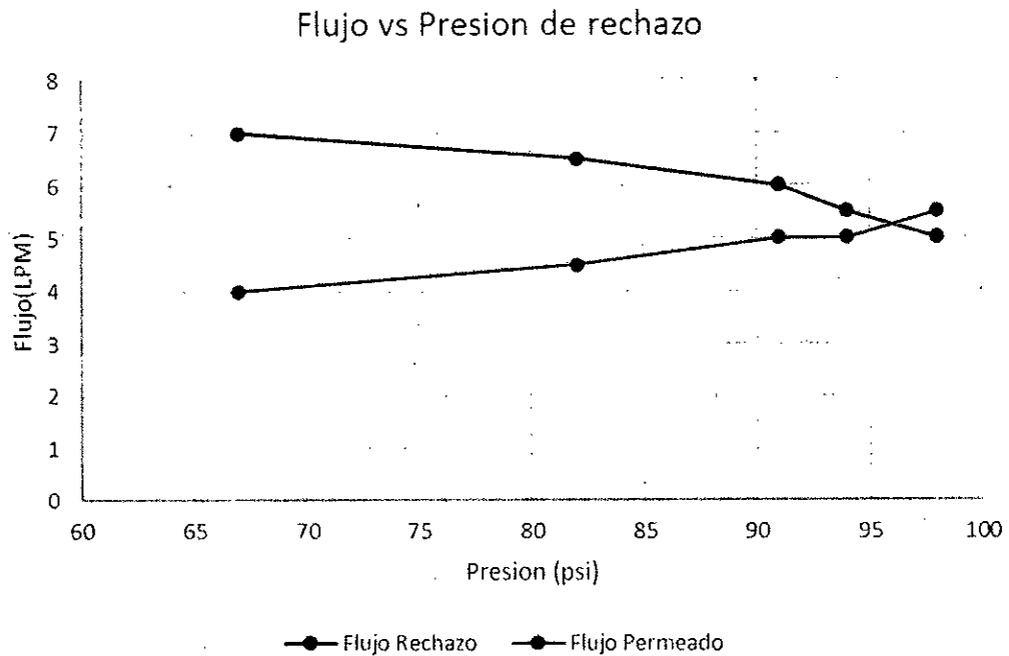


Figura 21: Flujo de rechazo y permeado con respecto a la presión de rechazo a la concentración de 4g/L de NaCl y 0,5 g de CaCl₂

Tabla 26: Presión (psi) – Conductividad (ms)

Presión de alimentación (psi)	Rechazo (psi)	Conductividad de rechazo	Conductividad de permeado
38	33	2.01	1.24
68	60	2.07	1.3
78	74	2.12	1.14
98	95	2.21	1.14
107	104	2.23	1.12

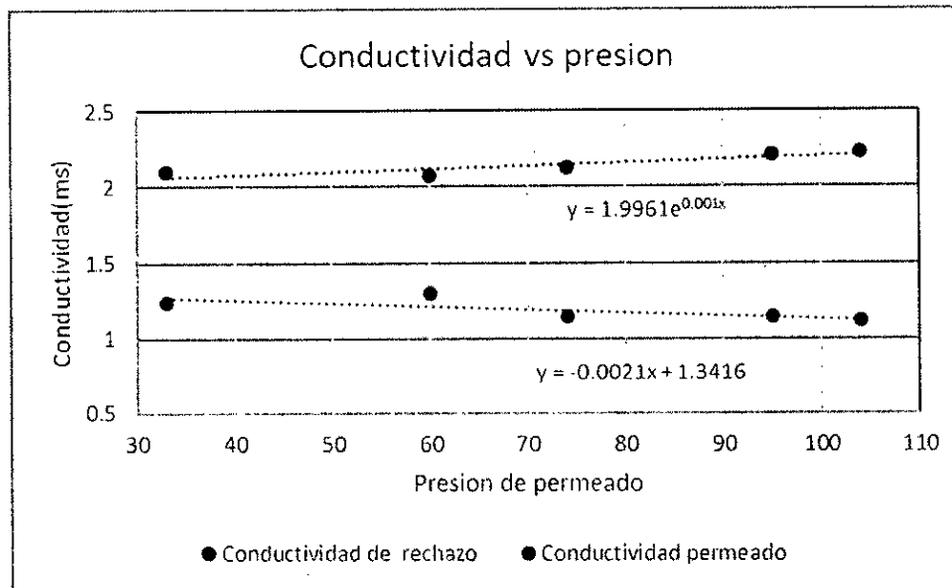


Figura 22: Conductividad de rechazo y permeado con respecto a la presión de rechazo a la concentración de 1g/L de NaCl

Tabla 27: Presión (psi) – Conductividad(ms)

N°	Presion de alimentacion (psi)	Rechazo (psi)	Conductividad de rechazo	Conductividad de permeado
1	62	60	7,42	4,47
2	68	66	8,12	5,24
3	78	76	8,31	5,59
4	87	85	8,38	5,74
5	98	96	8,76	5,82

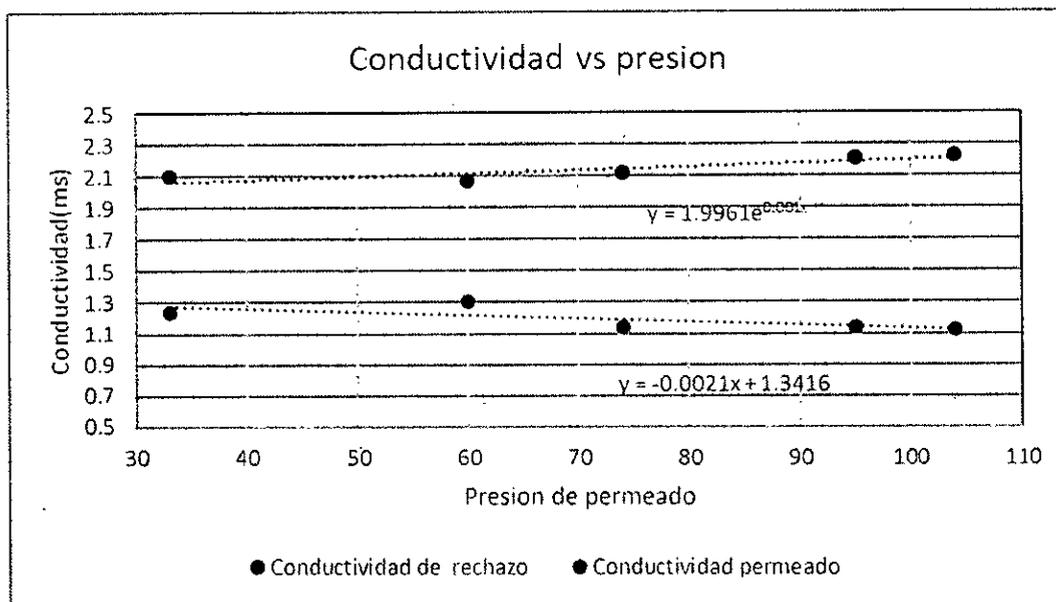


Figura 23: Conductividad de rechazo y permeado con respecto a la presión de rechazo a la concentración de 3g/L de NaCl

Tabla 28: Presión (psi) – Conductividad (ms)

Presion de alimentacion (psi)	Rechazo (psi)	Conductividad de rechazo	Conductividad de permeado
64	62	9,65	7,32
74	71	10,07	7,30
84	77	10,25	7,39
94	91	10,62	7,38
100	97	10,82	7,44

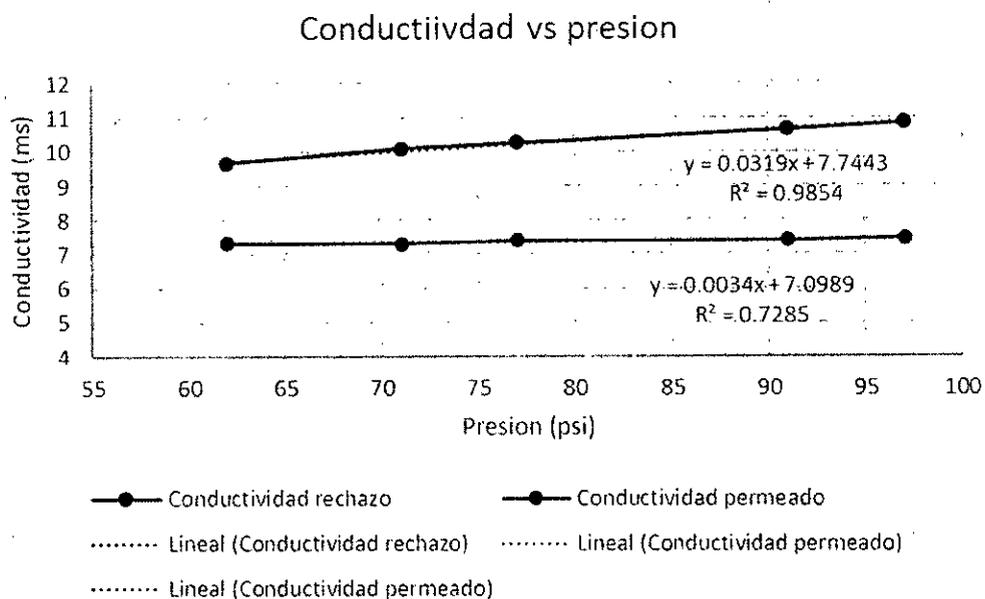


Figura 24: Conductividad de rechazo y permeado con respecto a la presión de rechazo a la concentración de 4g/L de NaCl

Tabla 29: Presión (psi) – Conductividad (ms)

Presión de alimentación (psi)	Rechazo (psi)	Conductividad de rechazo	Conductividad de permeado
72	67	11,25	8,41
86	82	11,3	8,13
94	91	11,47	8,10
98	94	11,51	8,17
100	98	11,73	8,23

Conductividad vs Presion

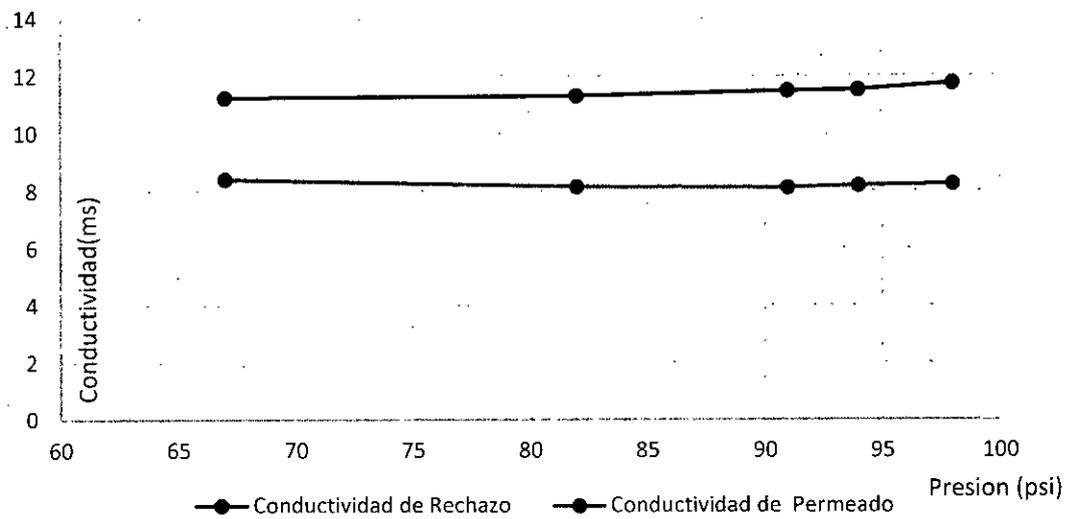


Figura 25: Flujo de rechazo y permeado con respecto a la presión de rechazo a la concentración de 4g/L de NaCl y 0,5 g de CaCl₂

VI. DISCUSION DE RESULTADOS

6.1. Contrastación de las hipótesis con los resultados de la caracterización físico química del agua subterránea

Según los resultados, de los parámetros físico químicos de agua salobre provenientes de pozo ubicado en el distrito de Lurín como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 30: Análisis de calidad de agua subterránea

Parámetros	Valores
Conductividad	6,01 $ms\ cm^{-1}$
pH	7,3
Turbidez	0,28 NTU
STD (mg/L)	
Dureza total	11,2 ml (889,75)
Ca^{2+} (mg/L)	386,6
Mg^{2+} (mg/L)	99,7
Na^{1+} (mg/L)	554,3
Cl^{1-} (mg/L)	1307,62
SO_4^{2-} (mg/L)	469,59
NO_3^{1-} (mg/L)	137,92
SiO_2 (mg/L)	

El agua subterránea presenta elevada conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y la composición de los cationes y aniones está por encima de DS N° 031-2010-SA. Los parámetros que cumplen con respecto al D.S son la turbidez y pH.



6.2 Contrastación de la hipótesis de los parámetros de operación del módulo de nanofiltración

6.2.1 Efecto de la presión

La Figura 3 se muestra el efecto de la presión aplicada sobre los flujos de permeado y concentrado, a medida que aumenta la presión, el flujo de permeado aumenta linealmente con aumento de la presión aplicada y el flujo de rechazo se reduce a medida que aumenta la presión. Esto nos indica que el rendimiento del módulo de la membrana nanofiltración es favorable con el incremento de la presión aplicada.

Se puede observar de la tabla que el porcentaje de desalinización aumenta linealmente con la presión aplicada, no existe variación significativa al porcentaje de desalinización con respecto a la conductividad inicial de la muestra.

De la tabla 15 se observa que la conductividad de los iones Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{1+} , Cl^{1-} , SO_4^{2-} , NO_3^{1-} en la corriente de permeado ha disminuido con respecto a la concentración inicial en diferentes porcentajes.

6.2.2 Efecto de la conductividad en la corriente de alimentación

Según los resultados obtenidos, a menor conductividad de alimentación al módulo de nanofiltración es favorable para alcanzar mayor porcentaje de desalinización (31,7%) como se indica en la tabla 9.

De las pruebas preliminares se observa que el flujo de permeado aumenta linealmente con la concentración de alimentación.

6.2.3 Efecto de la temperatura

Un aumento en la temperatura dio como resultado un incremento en el flujo de permeado y el porcentaje de desalinización a 100 °C el promedio de desalinización es de 27,05% de desalinización y le porcentaje de recuperación de flujo promedio a 100°C aumenta 23 % con respecto a 20°C .

6.3 Contrastación de las hipótesis de la caracterización físico química del agua permeado

Los parámetros fisicoquímicos medidos a la corriente de permeado a 100 psi, conductividad de 2,7 ms/cm y 28°C se observa en la siguiente tabla, el porcentaje de retención de los iones divalentes como ion calcio, magnesio y sulfato son mayores con respecto a los iones monovalentes

Tabla 31: Análisis de calidad de agua desalinizada

Parámetros	Valores		
	Alimentación	Permeado	% de remoción
Conductividad	2,71 $ms\ cm^{-1}$	2,05	24,3%
Turbidez	0,31 NTU	0,12	61,2%
STD (mg/L)			
Ca^{2+} (mg/L)	243,9	123,9	49,2%
Mg^{2+} (mg/L)	67,2	19,7	70,6%
Na^{1+} (mg/L)	282,7	222,7	21,2%
Cl^{1-} (mg/L)	639,65	584,29	8,65%
SO_4^{2-} (mg/L)	381,46	58,06	84,7%
NO_3^{1-} (mg/L)	69,85	37,59	46,1%



6.4 Contratación de los resultados con otros estudios similares

Para L.D. Naidu y S. Saravanan (2015) estudiaron los efectos de la presión aplicada a un sistema de nanofiltración cuyos resultados indican que el flujo permeado aumenta linealmente con el aumento de la presión aplicada, lo que sugiere que puede haber una polarización de concentración insignificante. Como se esperaba, el flujo de concentrado se reduce a medida que aumenta la presión. A.M. Hidalgo, M. Gómez (2012) en la discusión de sus resultados indican que al aumentar la concentración inicial de la disolución de NaCl que se introduce en el tanque a modo de alimentación decrece el valor del flujo de permeado. Esto se debe a que los aumentos en la concentración de sal provocan una mayor presión osmótica a vencer, para una misma presión de operación. En cuanto al porcentaje de rechazo se observa que para el $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ dicho porcentaje es ligeramente superior que para el NaCl.



VII. CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo experimental fue evaluar en qué medida influye los parámetros operacionales del equipo de nanofiltración en la desalinización del agua salobre y ser una alternativa para tratamiento de agua salobre para la obtención de agua potable.

1. De los parámetros fisicoquímicos evaluados del agua salobre procedente de pozo ubicado del distrito de Lurín, indica que la calidad está por encima de la norma como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 32: Parámetros físico químicos de LMP y agua salobre

<i>Parámetros</i>	<i>LMP</i>	<i>Agua salobre</i>
<i>Físicos químicos</i>	DS N 031-2010-SA	
Conductividad (us/cm)	1500	6 001
STD (mg/L)	1000	2 500
Dureza total(mg/L)	500	889,75
Turbiedad (NTU)	5	0,28
Cloruros(mg/L)	250	1 307,62
Sulfatos(mg/L)	250	469,59
Nitratos (mg/L)	50	137,92
Sodio (mg/L)	200	554,3

1. De la gráfica 26, se observa que el porcentaje de desalinización es dependiente en forma directa de la presión de alimentación aplicada y de la temperatura e inversamente proporcional a la concentración de alimentación. Los parámetros mas adecuados de operación del módulo d nanofiltración son a la presión de 100 psi , concentración inicial de 2,



ms/cm y temperatura de 28°C, alcanzando una porcentaje de desalinización de 32%.

2. Los parámetros fisicoquímicos obtenidos después de la desalinización a las condiciones de operación de presión a 100 psi , concentración inicial de 2,7 ms/cm y temperatura de 28°C . se muestra en la siguiente tabla. Se observa que los iones sulfato y nitrato están dentro los límites máximos permisibles

Tabla 33: Parámetros físicos químico obtenidos

Parámetros	Valores		
	Alimentación	Permeado	Rechazo
Conductividad	2,71 $ms\ cm^{-1}$	2,05	4,33
STD (mg/L)			
Dureza total			
Ca^{2+} (mg/L)	243,9	123,9	516,2
Mg^{2+} (mg/L)	67,2	19,7	137
Na^{1+} (mg/L)	282,7	222,7	329,3
Cl^{1-} (mg/L)	639,65	584,29	820,82
SO_4^{2-} (mg/L)	381,46	58,06	325,59
NO_3^{1-} (mg/L)	69,85	37,59	79,54



VIII. RECOMENDACIONES

1. Se recomienda efectuar estudios con otros parámetros operacionales como pH, flujo y otros tipos de membrana para ver su influencia con respecto a la desalinización
2. Se recomienda efectuar la experimentación en tiempos más prolongados para analizar el comportamiento de las membranas de nanofiltración.
3. Se recomienda efectuar un pretratamiento del agua salobre, etapas como prefiltración de 5 a 10 micras y filtros de carbón activado para eliminar ciertos olores que podrían presentar
4. Efectuar el comportamiento de las membranas de nanofiltración con soluciones sintéticas con presencia de iones calcio, sulfato, magnesio y monovalentes para ver su comportamiento
5. Efectuar experimentos con aguas residuales que presenten iones como sodio, calcio, magnesio y sulfato para efectuar una desalinización etc.
6. Se recomienda efectuar estudios de tratamiento de la corriente de concentrado para evitar la descarga de concentrados.



IX. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Abdelkader, B. A., Antar, M. A., & Khan, Z. (2018). Nanofiltration as a Pretreatment Step in Seawater Desalination: A Review. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 1-20.
- Abuhabib, A. A., Ghasemi, M., Mohammad, A. W., Rahman, R. A., & El-Shafie, A. H. (2013). Desalination of brackish water using nanofiltration: performance comparison of different membranes. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 38(11), 2929-2939.
- Boussouga, Y. A., & Lhassani, A. (2017). Study of mass transfer mechanisms for reverse osmosis and nanofiltration membranes intended for desalination.
- ElAzhar, F, ElAzhar, M , Hafsi , M Taky , M and Elmidaoui (2018) ,A Desalination of Brackish Water Using Low Pressure Nanofiltration Membranes: Comparison and Simulation Journal of Chemical and Pharmaceutical Research, 10(1):119-125
- Goh, P. S., Matsuura, T., Ismail, A. F., & Hilal, N. (2016). Recent trends in membranes and membrane processes for desalination. *Desalination*, 391, 43-60.
- Hilal, N., Al-Zoubi, H., Darwish, N. A., & Mohammad, A. W. (2007). Performance of nanofiltration membranes in the treatment of synthetic and real seawater. *Separation Science and Technology*, 42(3), 493-515.
- Llenas, L., Martínez-Lladó, X., Yaroshchuk, A., Rovira, M., & de Pablo, J. (2011). Nanofiltration as pretreatment for scale prevention in seawater reverse osmosis desalination. *Desalination and water treatment*, 36(1-3), 310-318.
- Medina, J.(2000) Desalinización de aguas salobres y de mar en ósmosis inversa. Madrid: Editorial Mundi Prensa, 799 pp.
- Phuntsho, S., Hong, S., Elimelech, M., & Shon, H. K. (2013). Forward osmosis desalination of brackish groundwater: Meeting water quality requirements for fertigation by integrating nanofiltration. *Journal of Membrane Science*, 436, 1-15.



- Somrani, A. A. H. H., Hamzaoui, A. H., & Pontie, M. (2013). Study on lithium separation from salt lake brines by nanofiltration (NF) and low pressure reverse osmosis (LPRO). *Desalination*, 317, 184-192.
- Su, B., Wu, T., Li, Z., Cong, X., Gao, X., & Gao, C. (2015). Pilot study of seawater nanofiltration softening technology based on integrated membrane system. *Desalination*, 368, 193-201.
- Walha, K., Amar, R. B., Firdaous, L., Quéméneur, F., & Jaouen, P. (2007). Brackish groundwater treatment by nanofiltration, reverse osmosis and electro dialysis in Tunisia: performance and cost comparison. *Desalination*, 207(1-3), 95-106.



ANEXOS

1. Matriz de consistencia
2. Validación de instrumentos
3. Flux de permeado y rechazo mediante membranas de nanofiltración
4. Variación de flx de permeado vs presión de alimentación



ANEXOS: MATRIZ DE CONSISTENCIA

Título : EVALUACIÓN DE LOS FACTORES DE OPERACIÓN DE MEMBRANA NANOFILTRACIÓN EN LA DESALINIZACIÓN DE AGUA SALOBRE

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVOS	HIPÓTESIS.	VARIABLES INDICADORES	Operacionalización de las variables independientes
<p>Principal</p> <p>¿Cómo afecta los factores de operación en la desalinización de agua salobre mediante un proceso de membranas de nanofiltración?</p> <p>Problemas Secundarios</p> <p>1. ¿Cuál será los parámetros físico químicos del agua salobre como fuente de alimentación a la membrana de nanofiltración para su desalinización?</p> <p>2. ¿Cuáles serán los factores y niveles de operación de la membrana de nanofiltración en la desalinización de agua salobre?</p> <p>3. ¿Cuál será las características físico químicas de las corrientes de concentrados y diluidas procedentes de la membrana de nanofiltración?</p>	<p>Objetivo General</p> <p>Evaluar los factores de operación en la desalinización de agua salobre mediante un proceso con membrana de nanofiltración</p> <p>Objetivos Específicos</p> <p>1. Caracterizar los parámetros físico químicos del agua salobre en la alimentación</p> <p>2. Identificar los factores y niveles de operación de la membrana nanofiltración</p> <p>3. Caracterizar los parámetros físico químicos de las corrientes de permeado y rechazo de la membrana nanofiltración</p>	<p>Hipótesis General</p> <p>Con la evaluación de los factores de operación en forma adecuada en la desalinización de agua salobre mediante membranas de nanofiltración, obtendremos agua potable de acuerdo a las normas nacionales.</p> <p>Hipótesis Específicas</p> <p>1. Al Caracterizar los parámetros físico químicos del agua salobre e procedentes se espera conocer la composición química (iones calcio, magnesio, sulfatos, carbonatos, turbidez etc.)</p> <p>2. Al seleccionar en forma adecuada los parámetros de operación (presión, flujo tiempo de operación, concentración de del agua salobre se logrará alcanzar altos valores de porcentaje de desalinización.</p> <p>3. Al caracterizar los parámetros físico químicos de la corriente de permeado se logrará conocer la composición de los iones presentes</p>	<p><i>X = Variable Independiente</i></p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Presión de operación (X₁) 2. conductividad de agua salobre (X₂) 3. Flujo (X₃) <p><i>Y=Variable dependiente</i></p> <p>Porcentaje de desalinización (y₁)</p> <p>Factor de recuperación (y₂)</p> <p>indicadores:</p> <p><i>porcentaje (%)</i></p> <p><i>factor de recuperación de flujo</i></p> <p><i>flux volumétrico</i></p>	<p>• Presión</p> <p>Presión de operación en la corriente de rechazo.</p> <p>Lectura directa en psi manómetro</p> <p>• Concentración</p> <p>Concentración de sales de la corriente de alimentación. Std , ms/cm</p> <p>Buretas, conductímetros</p> <p>• Flujo</p> <p>Flujo de permeado y rechazo</p> <p>Medida directa rotámetros</p>

TABLA N° 1

VALIDACIÓN INSTRUMENTOS Y COFIABILIDAD DE INSTRUMENTOS

TABLA N° 8.1

Factor	Equipos	Técnicas	Unidad
Presión	Manómetro	Medida directa	Psi- bar
Concentración de agua salobre	Conductímetro Absorción atómica	Medida directa	ms/cm, ppm
temperatura	termometro	Medida directa	°C.

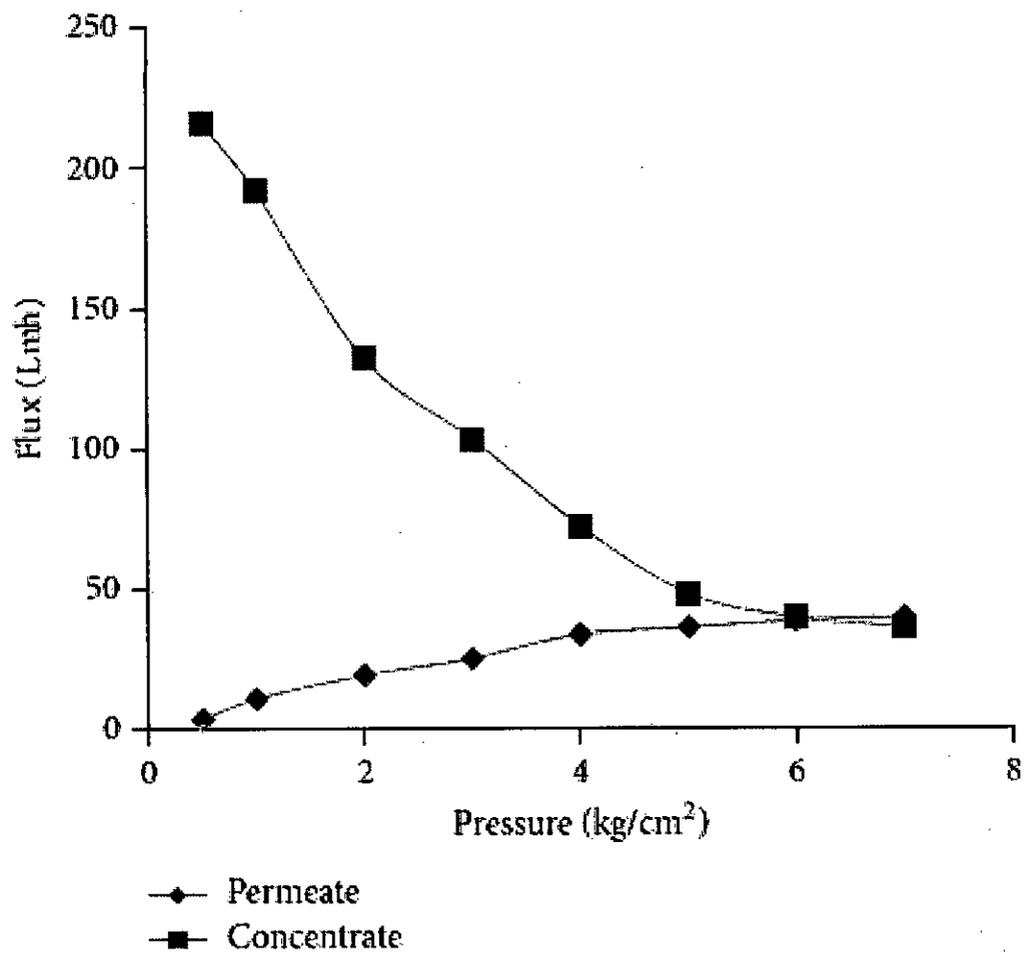


FIGURE 3: Fluxes of permeate and concentrate versus process pressure for nanofiltration.

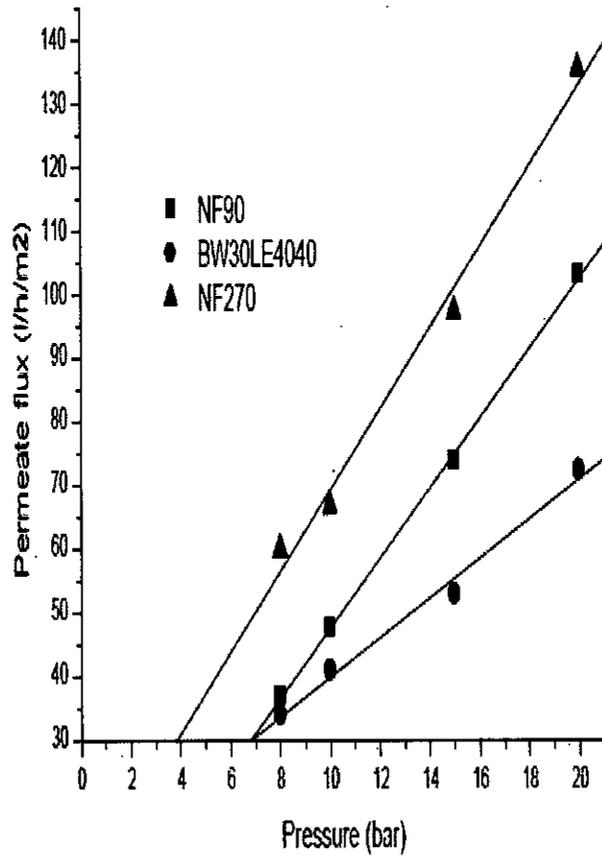


Figure 4: Variation of the flux versus applied pressure for three tested membranes.