

Evaluation of Reverse Osmosis Desalination to Mitigate Water Scarcity in Chancay, Peru: A Comprehensive Evaluation

Candela Torres, Christian Renato¹ ; Santuyo Huallpara, Aldo Bill² ; Segura Rodriguez, Wiliam Salvador³ 

¹ Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, U20191165@upc.edu.pe

² Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, U201911381@upc.edu.pe

³ Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, PCIIWSEG@upc.edu.pe

Abstract— Water demand on Peru's central coast has increased due to agricultural expansion and the development of the Chancay megaport project. Chancay currently faces a water deficit of 8,690 m³/day, worsened by sanitation infrastructure that covers only 70.73% of the city. This study assessed the technical, economic, and social feasibility of implementing a seawater reverse osmosis desalination plant as a sustainable response to projected water scarcity by 2044. A mixed-method approach was applied, including demand scenario modeling under climate change and population growth, technical optimization through response surface methodology to reduce energy consumption, and financial and social feasibility analysis. Results show that, under a severe scenario, the water deficit could reach 34,352 m³/day. To address this, a modular plant with a capacity of 35,000 m³/day was designed, consisting of four parallel trains to be implemented progressively. With energy recovery devices, each modular train achieves an integral specific energy consumption of 0.83 kWh/m³ under optimal operating conditions. Due to the modular scheme, the total plant SEC increases as new trains are incorporated every five years, starting at 0.83 kWh/m³ with one train and reaching 3.32 kWh/m³ with four trains. The financial assessment estimated a net present value of USD 13,366,560 and an internal rate of return of 19.41%, while 73.95% of the surveyed population expressed acceptance of the project overall, desalination is concluded to be a technically, economically, and socially viable alternative to strengthen water security in Chancay, provided that brine discharge is properly managed to reduce potential social and environmental risks.

Keywords— desalination, deficit, reverse osmosis, ERD, brine.

Evaluación de Desalinización por Ósmosis Inversa para Mitigar la Escasez de Agua en Chancay, Perú: Evaluación Integral

Candela Torres, Christian Renato¹ ; Santuyo Huallpara, Aldo Bill² ; Segura Rodríguez, Wiliam Salvador³ 

¹ Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, U20191165@upc.edu.pe

² Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, U201911381@upc.edu.pe

³ Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Perú, PCIIWSEG@upc.edu.pe

Resumen—La demanda hídrica en la costa central del Perú se ha intensificado debido a la expansión agrícola y al desarrollo del megaproyecto portuario de Chancay. Actualmente, el distrito enfrenta un déficit hídrico de 8,690 m³/día, exacerbado por una infraestructura de saneamiento que solo cubre el 70.73% de la ciudad. Este estudio evaluó la viabilidad técnica, económica y social de implementar una planta desalinizadora por ósmosis inversa (SWRO) como solución sostenible ante escenarios de escasez proyectados al 2044. La metodología empleó un enfoque mixto: se modelaron escenarios de demanda considerando el impacto del cambio climático y el crecimiento demográfico impulsado por el puerto; se optimizó el diseño técnico mediante superficies de respuesta para minimizar el consumo energético; y se analizó la viabilidad financiera y social. Los resultados indican que, bajo un escenario severo, el déficit podría alcanzar los 34,352 m³/día. Para mitigarlo, se diseñó una planta modular de 35,000 m³/día, estructurada en cuatro trenes paralelos de implementación progresiva. Mediante el uso de dispositivos de recuperación de energía (ERD), cada tren modular alcanza un consumo específico integral de energía de 0.83 kWh/m³ bajo condiciones óptimas de operación. Debido al esquema modular, el SEC total acumulado de planta aumenta conforme se incorporan nuevos trenes cada cinco años iniciando con 0.83 kWh/m³ con un tren y con la configuración final de 3.32 kWh/m³ con cuatro trenes. El análisis financiero proyectó un VAN de \$ 13,366,560 USD y una TIR del 19.41%, mientras que el 73.95% de la población mostró aceptación del proyecto. Se concluye que la desalinización es una alternativa viable para garantizar la seguridad hídrica en Chancay, mitigando riesgos de conflictos sociales y ambientales mediante una gestión adecuada de la salmuera.

Palabras clave—Desalinización, Déficit, Ósmosis inversa, Dispositivo de recuperación de energía, Salmuera.

I. INTRODUCCIÓN

Esta investigación presenta una evaluación integral para la implementación de una planta desalinizadora por ósmosis inversa en Chancay, Perú, con el fin de mitigar la escasez crítica de agua potable en la zona. El estudio articula de manera sistémica un análisis técnico de la tecnología de ósmosis inversa, una evaluación económica de su viabilidad financiera y un diagnóstico ambiental de sus impactos potenciales en relación con la salmuera y el consumo eléctrico. Este enfoque multidimensional permite determinar la sostenibilidad del proyecto como solución estratégica para la seguridad hídrica regional.

La escasez de agua potable representa uno de los desafíos globales más apremiantes del siglo XXI. Según la Organización de la Naciones Unidas [2], en 2022 aproximadamente 2,200 millones de personas carecían de acceso seguro a este recurso, una cifra que podría agravarse para 2050, afectando a tres de cada cuatro personas debido a las sequías y el cambio climático. El Perú no es ajeno a esta crisis; a pesar de contar con vastos recursos hídricos en la vertiente atlántica, la costa del Pacífico —donde reside el 70% de la población— dispone apenas del 2% del agua superficial, situando al país en una posición de estrés hídrico "medio-alto" a nivel regional [1]. Esta vulnerabilidad se intensifica en distritos costeros como Chancay, donde la obsolescencia de la infraestructura sanitaria y la presión de la actividad agrícola han generado un déficit hídrico estructural.

La problemática en Chancay adquiere una nueva dimensión con la construcción del Megapuerto, un proyecto que transformará la dinámica demográfica y económica local. Las proyecciones del Plan de Desarrollo Urbano estiman un crecimiento poblacional sostenido, lo que, sumado a la demanda industrial, elevará la presión sobre las fuentes de agua dulce ya comprometidas. Actualmente, la oferta de agua potable es de 29,325 m³/día frente a una demanda de 38,016 m³/día, generando un déficit diario de 8,690 m³ que limita el desarrollo local y la calidad de vida. En este contexto, la búsqueda de fuentes no convencionales es imperativa.

Desde una perspectiva tecnológica, la desalinización por ósmosis inversa (OI) se ha consolidado como la solución más eficiente a nivel global, abarcando el 69.9% del mercado debido a su menor consumo energético frente a procesos térmicos. Autores como [3] destacan que la viabilidad de estas plantas depende críticamente de la optimización energética y la mitigación de impactos ambientales. La incorporación de Dispositivos de Recuperación de Energía (ERD) ha permitido reducir el consumo específico de energía (SEC) en plantas modernas a valores cercanos a 2.0 kWh/m³, haciendo la tecnología económicamente competitiva. Sin embargo, la implementación en el Perú enfrenta barreras como la falta de un marco regulatorio específico para la gestión de salmuera y la incertidumbre sobre la aceptación social del costo tarifario asociado.

El presente estudio tiene como objetivo evaluar la viabilidad integral de implementar una planta desalinizadora SWRO en Chancay para el horizonte 2024-2044. A diferencia

de estudios previos, esta investigación delimita su alcance mediante: 1) La modelación de escenarios de demanda hídrica considerando variables de cambio climático y migración portuaria; 2) La optimización estadística del diseño técnico para minimizar el consumo energético utilizando superficies de respuesta; y 3) Un análisis de viabilidad económico-social que contrasta los indicadores financieros (VAN, TIR) con la disposición a pagar de la población local. Esta aproximación multidimensional busca proponer una solución técnica robusta que garantice la seguridad hídrica y prevenga conflictos socioambientales en el área de influencia del nuevo hub portuario.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología del estudio integra un análisis experimental de la calidad del agua, simulación de procesos mediante software especializado y un diseño estadístico para la optimización energética, finalizando con una evaluación económica.

A. Análisis fisicoquímico del agua de mar

Para determinar los parámetros de entrada del diseño, se realizaron 3 muestras en el litoral del distrito de Chancay. Los puntos de monitoreo se establecieron a 300 metros mar adentro desde el antiguo puerto para evitar la zona de rompiente y contaminación costera directa, recolectando las muestras a contracorriente, durante el periodo de junio-julio del 2024.

Las muestras fueron tomadas a una profundidad superficial de 0.5 m utilizando recipientes de polietileno transparente de boca ancha de 1 litro, previamente esterilizados. Para su conservación, se mantuvo una cadena de frío a 4°C mediante un sistema de refrigeración portátil hasta su análisis. El análisis fisicoquímico se ejecutó en el Laboratorio de Suelos, Aguas y Fertilizantes (LASPAF) de la UNALM, siguiendo los estándares del Protocolo Nacional para el Monitoreo de la Calidad de los Recursos Hídricos Superficiales de la Autoridad Nacional del Agua (ANA). La Tabla I detalla los parámetros analizados y los métodos empleados.

TABLA I
Parámetros fisicoquímicos del agua de mar y métodos analíticos

Parámetro	Unidad	Valor Promedio	Método/Referencia
pH	-	7.62	Electrométrico
Conductividad (C.E.)	dS/m	81.91	Conductimetría
Temperatura*	°C	17.4	Termometría
Calcio (Ca ²⁺)	meq/L	23.40	Volumetría
Magnesio (Mg ²⁺)	meq/L	133.33	Volumetría
Sodio (Na ⁺)	meq/L	573.91	Fotometría de llama
Cloruros (Cl ⁻)	meq/L	700.00	Argentometría
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	meq/L	25.52	Turbidimetría
Nitratos (NO ₃ ⁻)	meq/L	0.06	Colorimetría

*Nota: Se consideró la temperatura promedio histórica para el diseño base, aunque se evaluaron rangos de 13°C a 24°C.

Los resultados fisicoquímicos presentados en la Tabla I permiten caracterizar la calidad del agua de mar utilizada

como base para el diseño del sistema de ósmosis inversa. Los valores de conductividad eléctrica, sodio, cloruros, calcio y magnesio evidencian una matriz salina propia del agua marina, lo cual confirma la necesidad de emplear membranas SWRO con alta capacidad de rechazo de sales.

B. Análisis de la Percepción Poblacional

Para evaluar la percepción de la población de Chancay respecto a la implementación de una planta desalinizadora, se aplicó un cuestionario estructurado con preguntas tipo Likert y preguntas abiertas. El diseño muestral fue probabilístico estratificado proporcional, considerando que el distrito se divide en cuatro sectores con diferente tamaño poblacional. El tamaño de muestra se determinó mediante la fórmula de Cochran para población infinita:

$$n_0 = Z^2 \cdot p \cdot q / E^2$$

Donde Z=1.96, para un nivel de confianza del 95%; p=0.5, q=0.5 y E=0.05.

El cálculo inicial fue:

$$n_0 = (1.96)^2 (0.5) (0.5) / (0.05)^2 = 384.16$$

Posteriormente, se aplicó el ajuste para población finita, considerando una población total de N=65,127 habitantes:

$$n = N \cdot n_0 / (N + n_0 - 1)$$

$$n = 65,127 \cdot 384.16 / (65,127 + 384.16 - 1) = 382.17 \approx 383$$

Por tanto, la muestra final estuvo conformada por 383 personas. La asignación de encuestas por sector se realizó mediante muestreo estratificado proporcional:

$$n_i = (N_i / N) \cdot n$$

De esta forma, la muestra se distribuyó en: Sector 01 – Sur: 235 encuestas; Sector 02 – Este: 33 encuestas; Sector 03 – Centro: 86 encuestas; y Sector 04 – Norte: 29 encuestas. El análisis de los datos se realizó mediante estadística descriptiva, considerando frecuencias, porcentajes y comparación por sectores. Las respuestas abiertas fueron sistematizadas en categorías relacionadas con beneficios percibidos, preocupaciones ambientales, percepción tarifaria y expectativas de mejora del abastecimiento hídrico.

C. Análisis de la Demanda y Déficit de Agua Potable

Se revisaron documentos oficiales como el Plan de Desarrollo Urbano 2024 de la Municipalidad de Chancay, reportes de déficit hídrico del ANA y registros históricos de consumo de EMAPA Chancay. Se plantearon dos escenarios principales de crecimiento poblacional y demanda:

Escenario Base: Tasa de crecimiento del 1.94% anual para 10 años, con una demanda constante de 0.44 m³/seg y un déficit general de -2.91 m³/seg.

Escenario 01: Tasa de crecimiento del 1.94% anual para 20 años, con la demanda incrementando anualmente. Se

incluyeron sub-escenarios optimista y pesimista considerando el cambio climático y la disminución de la oferta de agua.

Escenario 02: Comparación del impacto de megapuentes en el crecimiento poblacional utilizando datos de seis ciudades con megapuentes (Shanghái, Dubái, Manzanillo, Cartagena, Santos).

D. Diseño y Simulación del Proceso (Hydranautics)

El dimensionamiento de la planta se realizó mediante el software IMSDesign (Integrated Membrane Solutions Design) 2021. Se configuró un sistema de Ósmosis Inversa (SWRO) de una sola etapa (single-pass), estructurado en 4 trenes paralelos para permitir una implementación modular y escalonada de la capacidad.

La planta se diseñó bajo un enfoque modular, en el cual cada tren constituye una unidad operativa independiente y equivalente dentro del sistema SWRO. El consumo específico de energía obtenido mediante IMSDesign/Hydranautics se interpretó como el SEC integral por tren modular, considerando los gastos energéticos asociados a su operación bajo las condiciones simuladas. Debido a la estrategia de implementación progresiva, el primer tren opera en la etapa inicial del proyecto; el segundo se incorpora al año 5; el tercero al año 10; y el cuarto al año 15. En consecuencia, el SEC total acumulado de planta se incrementa proporcionalmente al número de trenes instalados [6].

Para el cual mediante el software se procesaron 24 números de corridas en base a los factores principales como la temperatura (13-24°C), porcentaje de permeado (40-55%) y caudal de permeado (29000 m³/día - 35 000 m³/día) según los escenarios expresados, y los parámetros considerados a ingresar en la modelación del sistema de desalinización detallados en la Tabla II.

Tabla II
Parámetros de diseño y simulación en Hydranautics

Parámetro	Unidad	Valor de Diseño
Configuración	-	1 etapa, 4 trenes
Capacidad Final	m ³ /día	35,000
Membrana	-	SWC5-LD
Flujo Promedio	L/m ² *h	15
Recuperación	%	50%
Elementos por tubo	Unid.	8
Recipientes de presión	Unid.	82 por tren
Presión Operativa	Bar	60-65 (Estimada)
SDI Entrada	-	<3.0

La Tabla II resume los principales parámetros utilizados para la simulación del sistema de desalinización mediante el software IMSDesign/Hydranautics. La configuración propuesta considera una planta de una etapa, dividida en cuatro trenes modulares, con una capacidad final de 35,000 m³/día. La selección de membranas SWC5-LD responde a la necesidad de reducir pérdidas de presión y mejorar la eficiencia energética del proceso. Asimismo, la recuperación del 50%, el flujo promedio de 15 L/m²·h y la disposición de 82 recipientes de presión por tren establecen una base técnica coherente para una operación continua, escalable y compatible con las condiciones de agua de mar identificadas en Chancay.

E. Optimización Estadística mediante DOE (Design Expert)

Se aplicó un Diseño de Experimentos (DOE) utilizando la Metodología de Superficie de Respuesta (RSM) en el software Design Expert. Para el mapeo de la región operativa óptima en la interacción de dos factores críticos; temperatura (A, 13-24°C) y porcentaje de permeado (B, 40-55%) con un diseño central compuesto. Obteniendo la ecuación predictiva, como modelo matemático resultante permitiendo predecir el comportamiento del sistema bajo condiciones no experimentales.

Se añadió el ANOVA fundamental para separar la variabilidad debida de los factores con la de un error aleatorio, mediante el valor p y el coeficiente de correlación; así como la normalidad, homocedasticidad e independencia siendo estos supuestos críticos del DOE por el análisis de residuos obtenido con el Desing Expert en base a los datos de las 24 corridas.

Tabla III
Optimización de los 24 ensayos

Ensayo	Temperatura (°C)	Conversión (%)	SEC sin ERD (kWh/m ³)	SEC con ERD (kWh/m ³)
1	13	40	2.39	1.07
2	13	45	2.13	1.04
3	13	50	1.92	1.02
4	13	55	1.74	1
5	18.5	40	2.12	0.96
6	18.5	45	1.88	0.93
7	18.5	50	1.69	0.9
8	18.5	55	1.53	0.89
9	24	40	1.93	0.88
10	24	45	1.71	0.85
11	24	50	1.54	0.84
12	24	55	1.4	0.83

En la Tabla III se muestra el comportamiento del consumo específico de energía bajo diferentes combinaciones de temperatura y conversión. Se evidencia que el SEC disminuye progresivamente a medida que aumenta la temperatura del agua y el porcentaje de permeado, tanto en el escenario con ERD como sin ERD. Este comportamiento se demuestra porque una mayor temperatura reduce la viscosidad del agua, facilitando el paso del flujo a través de las membranas, mientras que una mayor recuperación permite aprovechar mejor el volumen de agua presurizada. El valor mínimo se alcanza a 24 °C y 55% de conversión, con un SEC de 0.83 kWh/m³ con ERD, lo que representa la condición operativa óptima para el tren modular evaluado.

F. Evaluación Económica

La viabilidad económica se determinó mediante un flujo de caja descontado a 20 años, calculando el Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Se asumió un financiamiento propio (CAPEX) y se proyectaron los costos operativos (OPEX) considerando la variación de capacidad modular. Los supuestos financieros basales se detallan en la Tabla IV.

TABLA IV
Supuesto económicos y técnicos

Parámetro	Unidad	Valor de Diseño
Vida útil del proyecto	Años	20
Tasa de descuento	%	8.00
Impuestos a la renta	%	29.50
Precio de energía	USD/kWh	0.12
Vida útil membranas	Años	5
Costo membrana	USD/unid.	500.00
Inversión específica	USD/m ³ /día	1,000.00
Factor de planta	%	90

III. RESULTADOS

Los hallazgos se presentan organizados conforme a los objetivos específicos, integrando el análisis hidrológico, la optimización estadística experimental y la evaluación financiera probabilística.

A. Evolución del Déficit Hídrico y Escenarios Futuros

El diagnóstico inicial reveló que el distrito de Chancay, con una población base de 65,127 habitantes, enfrenta una oferta estática de 29,325.96 m³/día frente a una demanda de 38,016.00 m³/día, resultando en un déficit estructural inmediato de -8,690.04 m³/día.

Los resultados fueron procesados mediante frecuencias y porcentajes, agrupando las respuestas favorables para estimar el nivel general de aceptación social. Bajo este criterio, el proyecto alcanzó una aceptación aproximada de 73.95%, lo que evidencia una predisposición positiva de la población hacia la implementación de la desalinización como alternativa para mitigar el déficit hídrico local.

Se modelaron tres escenarios de evolución para el horizonte 2024-2044, considerando las tasas de crecimiento urbano y el impacto del cambio climático sobre las fuentes hídricas naturales:

- Escenario Base: Proyección inercial según el Plan de Desarrollo Urbano (PDU), manteniendo el déficit constante por falta de nuevas infraestructuras.

- Escenario 1: Considera un crecimiento poblacional del 1.94% anual. Bajo condiciones de cambio climático severo (reducción de oferta del -1.60% anual), el déficit se triplicaría alcanzando los -28,325 m³/día para 2044.

- Escenario 2: Este escenario incorpora la dinámica migratoria observada en ciudades puerto análogas (Shanghái, Dubái, Manzanillo), aplicando tasas de crecimiento variables quinquenales. Bajo la variante pesimista (cambio climático severo), la brecha hídrica se maximiza hasta -34,352 m³/día al final del periodo.

La Fig. 1 consolida la divergencia de estos escenarios, evidenciando que la capacidad de diseño de la planta (35,000 m³/día) está justificada para cubrir el peor escenario proyectado con un margen de seguridad operativa.

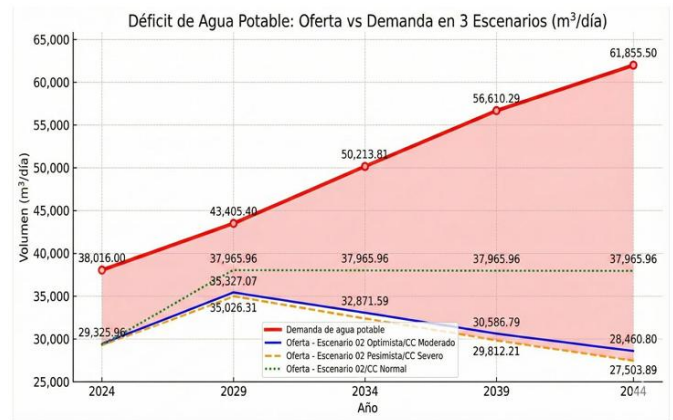


Fig. 1 Demanda y oferta en los escenarios de agua potable Chancay (m³/día)

B. Diseño y simulación del sistema

Se seleccionaron membranas SWC5-LD (Low Differential Pressure) debido a su eficiencia en el rechazo de sales y menor potencial de ensuciamiento. El sistema incluye Dispositivos de Recuperación de Energía (ERD) tipo intercambiador de presión isobárico para optimizar el consumo eléctrico. La Fig. 2 presenta los parámetros de entrada y salida de la simulación.

Contrapresión permeado (Variable), Intercambiador de presión

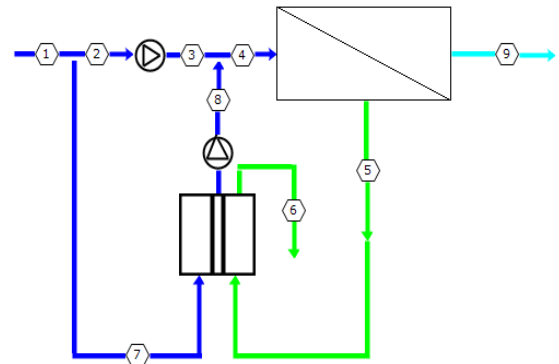


Fig. 2 Diagrama de flujo del proceso de OI con intercambiador de presión y control de contrapresión de permeado

TABLA V
Flujo del caudal permeado en el diseño de planta OI

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Caudal (m ³ /h)	729	368	368	729	365	365	361	361	365
Presión (bar)	0	0	22.8	22.8	21.9	0	0	22.8	8.00
TDS (mg/l)	2285	2285	2285	2357	4707	4562	2285	2431	6.46
pH	7.62	7.62	7.62	7.62	7.91	7.91	7.62	7.62	5.58
Econd (μs/cm)	4206	4206	4206	4326	8111	7881	4206	4447	14.1

La Tabla V evidencia el comportamiento hidráulico y fisicoquímico de las principales corrientes dentro del sistema de ósmosis inversa. Las variaciones de presión entre las corrientes reflejan el efecto del sistema de bombeo y recuperación de energía, elementos esenciales para mantener

la operación del sistema dentro de condiciones técnicas adecuadas.

C. Optimización del Diseño y Análisis Estadístico

En la Fig. 3 se muestra la superficie de respuesta 3D la tendencia del consumo energético específico de energía (SEC), en relación con los factores temperatura (A) y porcentaje de permeado (B) .

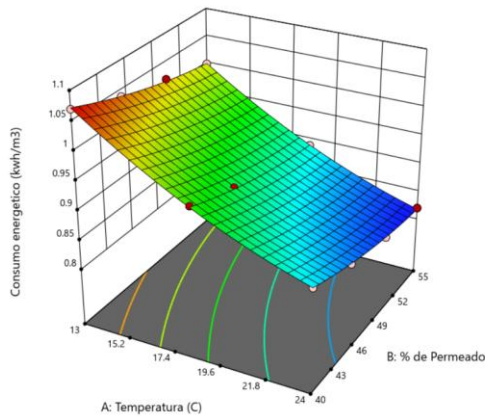


Fig. 3 Superficie de respuesta para el consumo energético en función de temperatura y permeado

Para los efectos de A se tiene una correlación inversamente proporcional entre la temperatura y el consumo energético, explicándose con la propiedad física por la reducción de la viscosidad del agua de mar, lo que facilita el paso de flujo a través de las membranas SWC5-LD y reduce la presión osmótica necesaria para la separación

Para los efectos de B el modelo identifica que operar en niveles de recuperación mas elevados cercanos al 55% contribuye a reducir SEC por unidad de volumen producido, debido a la maximización del aprovechamiento del agua presurizada antes de ser enviada al sistema de rechazo.

La interacción de ambos factores AB se visualizan en la sinergia entre ambas variables, siendo el punto de mínimo de energía requerida posible mediante la combinación precisa de una temperatura alta y una recuperación elevada.

La ecuación final en términos de factores codificados que predice el comportamiento energético del sistema es:

$$SEC = 2.078 - 0.042A - 0.021B + 5.5E^{-6}AB + 6.2E^{-4}A^2 + 1.6E^{-4}B^2 \quad (1)$$

El Análisis de Varianza (ANOVA) para el modelo cuadrático demostró una alta significancia estadística con un valor F de 1,516.08 y un p-value < 0.0001, lo que implica que hay menos del 0.01% de probabilidad de que estos resultados sean ruido. El ajuste del modelo fue robusto, con un R² ajustado de 0.9986 y un R² predicho de 0.9967, indicando una excelente capacidad predictiva.

TABLA VI
Modelo cuadrático por ANOVA/Design Expert

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	Interpretación
Model	0.079	5	0.0158	1516.08	< 0.0001	Significant
A - Temperatura	0.0703	1	0.0703	6750	< 0.0001	—
B - % de Permeado	0.0075	1	0.0075	718.24	< 0.0001	—
AB	0	1	0	2.16	0.192	—
A ²	0.0009	1	0.0009	90	< 0.0001	—
B ²	0.0002	1	0.0002	20	0.0042	—
Residual	0.0001	6	0	—	—	—
Cor Total	0.079	11	—	—	—	—

La Tabla VI presenta el análisis de varianza del modelo cuadrático utilizado para explicar el comportamiento del SEC en función de la temperatura y el porcentaje de permeado. Lo que indica que la probabilidad de que los resultados se deban al azar es mínima. Los factores individuales A (temperatura) y B (porcentaje de permeado) muestran efectos estadísticamente significativos sobre el consumo energético. Aunque la interacción AB no resulta significativa, los términos cuadráticos A² y B² sí contribuyen al ajuste del modelo, confirmando que la relación entre las variables operativas y el SEC no es estrictamente lineal. En conjunto, estos resultados respaldan la validez del modelo predictivo empleado para identificar las condiciones óptimas de operación.

La optimización numérica y la superficie de respuesta (Fig. 3) identificaron que la aplicación de condiciones operativas óptimas se encuentra a 24°C y 55% de recuperación. Bajo estas condiciones, y mediante la integración de Dispositivos de Recuperación de Energía (ERD) isobáricos configurados con una mezcla volumétrica del 10% y una fuga del 1%, cada tren modular alcanzó un SEC integral de 0.83 kWh/m³.

Este valor corresponde al consumo específico de energía de un tren modular bajo las condiciones simuladas. Debido a que la planta se implementa progresivamente mediante cuatro trenes paralelos, el SEC total acumulado de planta aumenta de manera escalonada conforme se incorporan nuevos módulos

Para representar el efecto del modularidad sobre el consumo energético, el SEC total acumulado de planta se estimó mediante:

$$SEC_{total,N} = SEC_{tren} \times N$$

Donde SEC_{total,N} es el consumo específico total acumulado de planta para N trenes operativos, SEC_{tren} es el consumo específico integral de un tren modular y N es el número de trenes implementados. Considerando SEC_{tren} igual a 0.83 kWh/m³, se obtiene SEC_{total,4} es igual a 3.32 kWh/m³.

D. Viabilidad Económica

El análisis financiero determinó la viabilidad del proyecto con una inversión inicial (CAPEX) de \$32,000,000 USD (incluyendo equipamiento, obra civil e ingeniería) para la capacidad final de 35,000 m³/día. Los costos operativos (OPEX) se estimaron en \$0.47 USD/m³, desglosados principalmente en energía (\$0.19/m³), mantenimiento (\$0.09/m³) y reposición de membranas (\$0.02/m³).

El flujo de caja descontado a 20 años, considerando una tarifa de venta de \$1.00 USD/m³ y una tasa de descuento del 8%, arrojó los siguientes indicadores de rentabilidad para el Escenario 2 (severo):

- Valor Actual Neto (VAN): \$13,366,560.00 USD
- Tasa Interna de Retorno (TIR): 19.41%.

La evaluación estocástica del flujo de caja arrojó un Valor Actual Neto (VAN) promedio de \$13,366,560 y una mediana de \$13,363,510. El análisis de la distribución de probabilidad, de carácter cuasi-normal, sitúa los percentiles P10 y P90 en \$13,005,570 y \$13,790,350 respectivamente. Estos resultados garantizan una probabilidad del 80% de obtener un VAN superior a los \$13 millones, confirmando la resiliencia financiera del proyecto ante la variabilidad de los flujos. Observados en la Fig. 4.

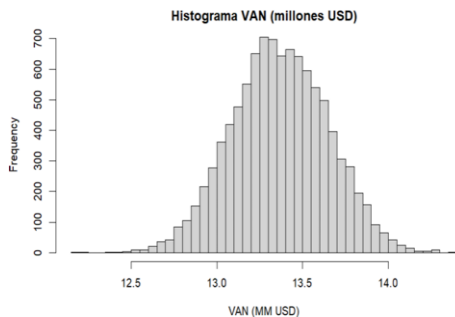


Fig. 4 Distribución de probabilidad del indicador VAN

E. Impacto Ambiental de la Salmuera

El estudio busca estimar la salinidad del vertido según los parámetros de diseño y definir la dilución mínima requerida en la Zona de Mezcla Inicial (ZMI), con el fin de mantener el aumento de salinidad en el lecho marino dentro de los criterios de calidad ambiental [7]. Además, calcula el número de Froude densimétrico inicial para caracterizar la descarga y realizar una evaluación cualitativa de la pluma de mezcla.

Con una recuperación de 0.5 y una producción de 17,500 m³/d, el caudal de alimentación requerido es $Q_{feed} = 35,000$ m³/d, cerrando el balance de masa (17,500 m³/d de permeado + 17,500 m³/d de salmuera). Bajo el supuesto de que la sal queda en la corriente de rechazo, la salinidad de descarga resulta $S_0 = 70$ g/L (≈ 70 PSU), valor típico para este nivel de recuperación. Para cumplir el criterio ambiental en el borde de la Zona de Mezcla Inicial (ZMI), la dilución mínima requerida se estima en $S_{req} = 17.5$, es decir, la pluma debe reducir la

concentración inicial unas 17–18 veces antes de contactar el fondo o salir de la ZMI.

La ecuación respectiva para la cuantificación de la salmuera descargada en base al caudal:

$$S_0 = (35,000/17,500) \times 35 = 2 \times 35 = 70 \text{ g/L } (\approx 70 \text{ PSU}) \quad (2)$$

En el análisis hidrodinámico, con $\rho_a \approx 1025$ kg/m³ y $\rho_0 \approx 1050$ kg/m³, se obtiene $\Delta\rho = 25$ kg/m³ y una aceleración reducida $g' \approx 0.24$ m/s². Con $U_0 \approx 4$ m/s y $d = 0.25$ m, el número de Froude densimétrico inicial es $F_0 \approx 16.3$, lo que caracteriza una descarga altamente energética y turbulenta, favorable para alcanzar la dilución exigida en distancias cortas. Usando una relación empírica para chorros densos y evaluando a 50 diámetros del puerto (12.5 m), la desviación vertical estimada es $n \approx 11.2$ m, indicando que la mezcla intensa se concentra en un entorno compacto (≈ 10 – 15 m alrededor del difusor).

Operando los valores:

$$F_0 = U_0 / \sqrt{g' \cdot d} \quad (3)$$

$$F_0 \approx 4/0.245 \approx 16.3 \quad (4)$$

Dado que la columna de agua es de ~ 30 m, el comportamiento estimado encaja con el sitio y respalda la viabilidad ambiental preliminar: pese a descargar 70 g/L, la energía del difusor ($F_0 \approx 16$) permitiría lograr $S_{req} = 17.5$ dentro de la ZMI, dejando como siguiente paso la modelación de campo lejano y la integración en el EIA.

IV. DISCUSIÓN

A. Proyección de Demanda y Contexto Demográfico

El diseño de la planta para el periodo 2024-2044 responde a un crecimiento orgánico acelerado en Chancay. Al contrastar con estudios en la región, como el de [4], se observa que el uso de modelos aritméticos y geométricos es estándar para poblaciones que superan los 60,000 habitantes. Sin embargo, este estudio optimiza la precisión al considerar no solo el crecimiento poblacional (1.94% anual), sino también el déficit hídrico base y los escenarios de estrés climático, garantizando un margen de seguridad hídrica superior a los modelos convencionales que carecen de rigurosidad multivariable.

B. Eficiencia Energética

El resultado energético más relevante del estudio es la obtención de un SEC integral de 0.83 kWh/m³ por tren modular, bajo condiciones óptimas de 24 °C y 55% de recuperación, mediante la incorporación de dispositivos de recuperación de energía tipo intercambiador de presión isobárico. Este valor no representa el SEC total final de la planta, sino el consumo específico correspondiente a un tren operativo del sistema SWRO.

La interpretación del resultado debe realizarse considerando la estrategia modular del proyecto. La planta final de 35,000 m³/día se estructura en cuatro trenes paralelos, implementados progresivamente cada cinco años. Bajo este

esquema, el SEC total acumulado de planta aumenta conforme se incorporan nuevos trenes. Esta aclaración permite resolver la aparente discrepancia observada respecto al valor de 0.83 kWh/m³. Dicho valor es bajo si se interpreta como SEC total de la planta completa; sin embargo, resulta técnicamente coherente al ser entendido como SEC integral por tren modular. En la configuración final, el SEC total acumulado de 3.32 kWh/m³ se ubica dentro del rango reportado para plantas SWRO comerciales con ERD, lo que refuerza la viabilidad energética del diseño propuesto para Chancay.

C. Viabilidad Socioeconómica y Tarifaria

La percepción social favorable en Chancay coincide con la tendencia de aceptación de tecnologías de desalinización ante la escasez crítica. No obstante, el análisis de la disposición a pagar revela un umbral de sensibilidad económica. Mientras que [5] advierten que incrementos superiores al 15% en las tarifas generan resistencia social en la región mediterránea, los resultados en Chancay sugieren la necesidad de subsidios cruzados o tarifas diferenciadas, tal como recomienda el [8], para evitar conflictos sociales y garantizar la equidad.

D. Gestión Ambiental: Dicotomía Salmuera vs. Costo

La gestión de 17,500 m³/día de salmuera (65-70 g/l) representó el principal reto ambiental. El contraste técnico entre alternativas fue determinante:

- Tecnologías ZLD/MVC: Aunque eliminan el vertido, elevarían el costo operativo a 3.50 - 10.00 USD/m³, triplicando el costo final del agua [9].
- Emisarios Submarinos: Seleccionados por su eficiencia de ingeniería de valor (0.10 - 0.50 USD/m³), permiten una dilución rápida mediante difusores, mitigando el choque osmótico sin la huella de carbono excesiva de los procesos térmicos [10].

TABLA VII
Comparativa de estrategias de Gestión de Salmuera

Estrategia	Impacto Ambiental	Viabilidad Económica (\$/m ³)	Decisión
Descarga Cero Líquidos (ZLD)	Bajo (residuos sólidos)	Baja (\$3.50 - \$10.00)	Descartada
Evaporación Solar	Medio (uso de suelo)	Media (Depende del terreno)	Descartada
Emisarios Submarino	Controlado (Dilución)	Alta (\$0.05 - \$0.15)	Seleccionada

La Tabla VII compara distintas alternativas para la gestión de la salmuera generada por la planta desalinizadora. Si bien las tecnologías de descarga cero líquida presentan un menor impacto directo por vertimiento, su elevada demanda energética y costo operativo las hacen poco viables para el contexto de Chancay. La evaporación solar, aunque técnicamente posible, presenta limitaciones asociadas al uso extensivo de suelo y a su dependencia de las condiciones climáticas. En contraste, el emisario submarino con difusores representa la alternativa más adecuada, debido a su menor

costo, mayor viabilidad operativa y capacidad para favorecer la dilución controlada de la salmuera en la zona de mezcla inicial. Por ello, esta opción se selecciona como la estrategia ambientalmente manejable y económicamente más conveniente para el proyecto.

E. Sostenibilidad Financiera y Huella de Carbono

Con un CAPEX de ~USD 32 millones y un OPEX de 0.47 - 1.00 USD/m³, el proyecto se alinea con los rangos globales de 0.5 - 1.5 USD/m³ reportados por [11]. (2013). La huella de carbono estimada de 0.37 kg CO₂/m³ es notablemente baja gracias al bajo SEC obtenido. Sin embargo, la volatilidad energética en Perú sugiere que la integración de energía solar fotovoltaica es el siguiente paso lógico para reducir la vulnerabilidad financiera ante fluctuaciones de precios eléctricos [12].

TABLA VIII
Comparativa del consumo específico de energía en sistemas SWRO

Fuente / Referencia	Tecnología / Configuración	SEC (kWh/m ³)
Ihsanullah et al. (2021)	SWRO Estándar Comercial	2.5 - 4.5
Kim et al. (2019)	SWRO con ERD Avanzado	1.0 - 1.5
Este Estudio (Chancay)	SWRO + ERD Optimizado	0.83

V. CONCLUSIONES

Este proyecto de investigación concluye que la implementación de una planta desalinizadora por ósmosis inversa en el distrito de Chancay, Lima, Perú, es una solución viable para mitigar la creciente escasez de agua potable. Los principales puntos que respaldan esta conclusión son:

Déficit hídrico significativo: Chancay enfrenta un déficit hídrico actual de 8,690.04 m³ diarios, con proyecciones de demanda que superarán la oferta existente, exacerbado por el crecimiento poblacional y el desarrollo del megapuerto.

Factibilidad técnica demostrada: El diseño de una planta desalinizadora SWRO con capacidad final de 35,000 m³/día, configurada mediante cuatro trenes modulares de implementación progresiva, demuestra la viabilidad técnica de la propuesta para cubrir el déficit hídrico proyectado en el escenario severo. La simulación con IMSDesign/Hydranautics y la optimización mediante superficie de respuesta permitieron identificar una condición óptima de 24 °C y 55% de recuperación, bajo la cual cada tren modular alcanza un SEC integral de 0.83 kWh/m³. Debido al escalamiento modular, el SEC total acumulado de planta aumenta progresivamente, alcanzando 1.66 kWh/m³ con dos trenes, 2.49 kWh/m³ con tres trenes y 3.32 kWh/m³ en la configuración final de cuatro trenes.

Viabilidad económica confirmada: Con costos iniciales de construcción estimados en 32 millones de dólares y un costo operativo de 1.00 USD/m³, los indicadores financieros como el Valor Actual Neto (VAN) de \$13,366,560 USD. y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 19.41% confirman la atractividad económica del proyecto.

Consideraciones ambientales y sociales: El estudio subraya la importancia de una gestión adecuada de la salmuera, el principal residuo, para minimizar el impacto

ambiental. Además, se destaca la necesidad de considerar la percepción pública y desarrollar un marco legal específico para la desalinización en Perú.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Los autores expresan su sincera gratitud a la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC) por el invaluable apoyo académico y los recursos facilitados, los cuales fueron pilares fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

Se extiende un especial reconocimiento a la Municipalidad Distrital de Chancay por su fundamental apoyo institucional y las facilidades brindadas para el trabajo de campo.

Asimismo, agradecemos profundamente la colaboración técnica y la provisión de datos estratégicos por parte de la Autoridad Nacional del Agua (ANA), a través de su Administración Local de Agua Chancay-Huaral, y a la EPS Emapa Chancay S.A., por su disposición y por compartir información esencial sobre la gestión del servicio.

La contribución de estas entidades enriqueció significativamente el alcance y la precisión del presente estudio.

REFERENCIAS

- [1] CEPLAN. (2023, January 19). Perú: alto riesgo de vulnerabilidad debido a crisis del agua - Noticias - Centro Nacional de Planeamiento Estratégico - Plataforma del Estado Peruano. <https://www.gob.pe/institucion/ceplan/noticias/690049-peru-alto-riesgo-de-vulnerabilidad-debido-a-crisis-del-agua>
- [2] ONU. (2023). Agua | Naciones Unidas. <https://www.un.org/es/global-issues/water>
- [3] El-Dessouky, H. T., & Ettouney, H. M. (2002). Multi-Stage Flash Desalination. Fundamentals of Salt Water Desalination, 271–407. <https://doi.org/10.1016/B978-044450810-2/50008-7>
- [4] Cortes, L., & Lesmes, L. (2014). Simulación de una planta desalinizadora de agua de mar, por medio del software ims desing como estrategia para fortalecer el desarrollo social del norte caribe colombiano-municipio de Uribí-La Guajira. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11593.39528>
- [5] Ihsanullah, I., Atieh, M. A., Sajid, M., & Nazal, M. K. (2021). Desalination and environment: A critical analysis of impacts, mitigation strategies, and greener desalination technologies. Science of The Total Environment, 780, 146585. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.146585>
- [6] Kim, J., Park, K., Yang, D. R., & Hong, S. (2019). A comprehensive review of energy consumption of seawater reverse osmosis desalination plants. Applied Energy, 254, 113652. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.113652>
- [7] Klinko, K., & Wilf, M. (2012). Optimization of Sea Water RO Systems Design. [https://doi.org/10.1016/S0011-9164\(01\)00278-8](https://doi.org/10.1016/S0011-9164(01)00278-8)
- [8] Ministerio de Ciencia, T. C. e I., & Climático, C. C. de C. (2022). Desalinización: Oportunidades y Desafíos para Abordar la Inseguridad Hídrica en Chile. <https://repositoriodirplan.mop.gob.cl/biblioteca/handle/20.500.12140/206243>
- [9] Voutchkov, N. (2018). Energy use for membrane seawater desalination – current status and trends. Desalination, 431, 2–14. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2017.10.033>
- [10] Missimer, T. M., & Maliva, R. G. (2018). Environmental issues in seawater reverse osmosis desalination: Intakes and outfalls. Desalination, 434, 198–215. <https://doi.org/10.1016/J.DESAL.2017.07.012>
- [11] Ghaffour, N., Missimer, T. M., & Amy, G. L. (2013). Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability. Desalination, DESAL.2012.10.015 309, 197–207 <https://doi.org/10.1016/J>
- [12] Feria-Díaz, J. J., Correa-Mahecha, F., López-Méndez, M. C., Rodríguez-Miranda, J. P., & Barrera-Rojas, J. (2021). Correction: Feria-Díaz et al. Recent Desalination Technologies by Hybridization and Integration with Reverse Osmosis: A Review. Water 2021, 13, 1369. Water 2021, Vol. 13, Page 3199, 13(22), 3199. <https://doi.org/10.3390/W13223199>