

Tratamiento de agua salobre mediante nanofiltración solar a baja presión para irrigación

• José Jassón Flores-Prieto* •

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, México

**Autor de correspondencia*

• J. Javier Ramírez-Luna • César Calderón-Mólgora • Emir Delgado-Quezada •

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

• Alan de Jesús Morales-García •

Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, México

Resumen

Flores-Prieto, J. J., Ramírez-Luna, J. J., Calderón-Mólgora, C. G., Delgado-Quezada, E., & Morales-García, A. J. (noviembre-diciembre, 2015). Tratamiento de agua salobre mediante nanofiltración solar a baja presión para irrigación. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(6), 5-17.

En este trabajo se presenta una solución para tratar agua salobre mediante nanofiltración fotovoltaica a baja presión (NF-FV-BP), orientada a la habilitación de tierras improductivas en términos agrícolas. La zona de estudio fue la región hidrológica RH26 del desierto de Chihuahua (subcuenca Aj Río Verde), la cual se consideró representativa de cuencas con sedimento salino debido a drenaje ineficiente. El agua subterránea disponible presentó un alto contenido de sulfatos (1 863 mg/l) y 2 195 mg/l de sólidos disueltos totales (SDT), lo que compromete su viabilidad para riego. El tratamiento de NF-FV-BP se propuso por ser apto para la remoción de iones divalentes como los sulfatos, para así disminuir la concentración de SDT. El tratamiento se realizó utilizando tanto agua sintética como la disponible en la región de estudio, determinando la eficiencia de remoción de SDT y de sulfatos, energía específica, producción diaria y viabilidad de su operación en campo. En los resultados se observó que la eficiencia de remoción de SDT, energía específica y productividad se relacionan con la irradiación, y se obtuvo una correlación lineal para cada caso. Los sulfatos y los SDT se redujeron en un 98.21 y 75.15%, respectivamente, a una irradiación igual o superior a 750 W/m², con una energía específica de 1.94 kWh/m³. En campo, la productividad de permeado resultó de 3.2 m³/día, a insolación promedio de 6.3 hora pico/día en el plano de los módulos fotovoltaicos. La operación continua del prototipo durante cuatro meses por parte de usuarios mostró viabilidad de la solución propuesta.

Palabras clave: nanofiltración fotovoltaica, desalinización solar, nanofiltración a baja presión, irrigación solar.

Abstract

Flores-Prieto, J. J., Ramírez-Luna, J. J., Calderón-Mólgora, C. G., Delgado-Quezada, E., & Morales-García, A. J. (November-December, 2015). Solar Brackish Water Treatment for Irrigation Using Low-Pressure Nanofiltration. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(6), 5-17.

This work relates a solution for brackish water treatment by low pressure NF using photovoltaic energy oriented to offer space to agricultural activities in remote areas. The study area was the sub basin Aj of the Pánuco River basin, in the RH26 hydrological region of the Chihuahua desert, which was considerate representative of endorheic basins around sampling zone. The raw water had high content of sulfate (1863 mg/l), which mainly demerits its quality. The total dissolved solids (TDS) were 2 195 mg/l. A photovoltaic low pressure nanofiltration treatment was proposed to primarily remove sulfates (divalent ion). The treatment was studied using synthetic and raw water, determining the removal efficiency of TDS and sulfates, the specific energy, the daily production and the viability of its field operation. In the results, the removal efficiency of TDS, the specific energy and the productivity were significantly associated with irradiation, and then linear correlations were obtained for each case. Sulfates and TDS were removed 98.21 and 75.15%, respectively, at equal or higher level of irradiation of 750 W/m² and specific energy of 1.94 kWh/m³. Under field conditions, the permeate productivity was 3.2 m³/day, at average insolation of 6.3 peak-sun-hours/day, above PV modules. The continuous operation of the desalination system by users during four months, without specialized assistance, showed feasibility of the proposed solution.

Keywords: Nanofiltration photovoltaic, solar desalination nanofiltration low pressure, solar irrigation.

Received: 26/03/2014

Accepted: 13/05/2015

Introducción

En América Latina y en particular en México existen grandes extensiones de tierras salitrosas en donde la vegetación es escasa o nula. El suelo mexicano con exceso de sales representa 15% del territorio potencialmente productivo (Oosterbaan, 1995; Pulido-Madrigal, 1996). En gran medida, la salinidad de las tierras se debe a que están ubicadas en cuencas con drenaje ineficiente, donde en tiempo de lluvias se depositan sedimentos con sales debido a los escurrimientos y en la temporada de estiaje sólo se evapora el agua. Así, la salinidad del recurso hídrico en el subsuelo se intensifica al transcurrir cada ciclo, con la inadecuada nivelación de tierras y el inapropiado uso de agroquímicos. La combinación de suelo con drenaje ineficiente y la considerable incidencia de radiación solar hacen de este tipo de lugares lo que se conoce como páramos, donde es común el asentamiento humano marginado. Potenciar las capacidades agrícolas de comunidades aisladas/marginadas y la ampliación de las tierras cultivables mediante el tratamiento de agua salobre es la razón de este trabajo, ampliando estudios en regiones áridas de otros países, como lo han reportado Yu, Liu, Wang y Liu (2011).

Hoy día, la desalinización de agua salobre se ha venido realizando principalmente mediante ósmosis inversa (OI), pues dicha tecnología ha mostrado menores costos energéticos y su espectro de productividad diaria es relativamente amplio, como lo reportan Ludwig (2010), MacHarg (2011), Isaka (2012), y Dévora-Isiordia, González-Enríquez y Ruiz-Cruz (2013), entre otros. Por su parte, el tratamiento por nanofiltración (NF) permite eliminar partículas ajenas al agua, en cierta medida, mediante ósmosis inversa, debido a que el tamaño de partículas que permea es mayor que el tamaño de partícula que trata la OI como tal. Algunos autores la consideran un caso dentro del espectro de la OI (< 0.01 nm) y se ha venido utilizando para eliminar partículas con diámetros mayores que 2 nm. Lo anterior en razón de que es un proceso más económico en términos energéticos y de

requerimientos de equipos (Leo, Yahya, Kamal, Ahmad, & Mohammad, 2013; Pontié, Dach, Leparc, Hafsi, & Lhassani, 2008). La NF permite reducir la robustez de los equipos en relación con el OI por trabajar a menores presiones hidráulicas, y en algunos casos se utiliza como pretratamiento en OI para un mejor control del ensuciamiento de las membranas.

En la actualidad, en numerosos estudios se ha observado que la NF ha venido siendo una alternativa, o parte de una solución, para desalinización de agua salobre para consumo humano, en donde se implica en especial la remoción de iones divalentes (Ghermandi & Messalem, 2009); es decir, en aquellos casos particulares de calidades de agua para consumo humano donde los iones monovalentes no son un problema. La NF está sujeta a menor presión osmótica que la OI, al retener iones de mayor tamaño, y en consecuencia requiere de menores presiones en relación con la OI para remover sales del agua. Por lo anterior requiere de equipo menos robusto y bombas con menor potencia, donde la energía solar fotovoltaica ha venido teniendo amplia cabida. En diversos trabajos se ha reportado el uso de sistemas de NF trabajando a presiones óptimas relativamente bajas, en los cuales la disminución de la robustez y, en consecuencia, la disminución de costos de operación e inversión es evidente, como se ha reportado en Koyuncu, Yazgan, Topacik y Sarikaya (2001), Schäfer, Broeckmann y Richards (2005), Richards y Schäfer (2003), y Hrayshat (2008). Sin embargo, como ya se dijo, las aplicaciones de la NF para agua salobre se han venido dando en particular para obtener agua donde el consumo humano es prioritario, como lo han reportado Werner y Schäfer (2007); es conveniente, además, llevar a cabo estudios para optimar el tratamiento para la remoción de sustancias específicas, que demeritan la calidad de agua para el riego agrícola en regiones aisladas/marginadas.

En diversos trabajos se ha observado la factibilidad de la NF fotovoltaica (NF-FV) para tratar agua en lugares aislados para consumo humano (Isaka, 2012). Por lo general se reporta

la energía específica y la productividad como valores constantes; también se tienen promedios diarios, mensuales o de temporadas específicas (Hrayshat, 2008). Por su parte Richards, Richards y Schäfer (2011) reportaron un estudio de retención que depende de la irradiación disponible en un intervalo de 0.2-1.0 kW/m². Es conveniente ahondar en estudios de tratamiento de agua por NF-FV a baja presión (BP) para fines específicamente agrícolas, donde la remoción de la/las sustancias críticas sea atendida, reduciendo la remoción de las sustancias minerales necesarias en la irrigación o ferti-irrigación. Los estudios previos en algunos casos consideran la NF-FV para lugares aislados, a fin de obtener agua para consumo humano e irrigación a la vez, como lo mostraron Kaldellis, Meidanis y Zafirakis (2011). En general, se han reportado diversos trabajos que tratan la calidad del agua para irrigación, como el de Ontiveros-Capurata, Diakite-Diakite, Álvarez-Sánchez y Coras-Merino (2013), y la OI para irrigación a gran escala utilizando energía convencional, como el caso de Shaffer, Yip, Jack y Elimelech (2012). Los estudios de tratamientos para remoción de sulfatos con diferentes tecnologías son asistidos por lo general con energía convencional, como son los casos de Phuntsho, Shona, Hongb, Leeb y Vigneswarana (2011), y Phuntsho, Hong, Elimelech y Shon (2013). Lo anterior implica la conveniencia de estudios detallados del tratamiento de agua mediante NF-FV para irrigación, para su optimación en términos energéticos, de procesos y de remoción de sustancias específicas.

En este trabajo se estudia la alternativa de tratamiento de agua salobre para irrigación con NF-FV-BP para habilitar tierras ubicadas en cuencas con drenaje ineficiente, que en términos agronómicos no son productivas en la actualidad. La tecnología de NF-FV-BP se estudia partiendo del establecimiento de la calidad del agua de una zona representativa de cuencas con drenaje ineficiente, después se propone un diseño del sistema de NF-FV-BP sencillo en su configuración, operación y

mantenimiento. La viabilidad se determina en términos de su eficiencia para la remoción de sulfatos (SO₄⁻²) y SDT a diferentes irradiaciones; se evalúa la energía específica y la productividad dependiendo de la irradiación. También se determina la operatividad del sistema por parte de productores usuarios potenciales de la tecnología.

Materiales y método

Muestreo

En el estudio se trataron dos lotes de agua sintética preparada a partir de agua de pozo con bajo contenido de SDT (c.e. 250 µS/cm) a los que se añadió NaCl, Na₂SO₄ y CaSO₄ para alcanzar concentraciones de 1 107 y 1 843 mg/l en el primer y segundo lote, respectivamente. También se trataron lotes del agua disponible en la zona de estudio.

Ubicación de zona de estudio

La zona de estudio se localizó en el desierto de Chihuahua, México. Las muestras se tomaron de la Región Hidrológica RH26 de la cuenca del río Pánuco en la subcuenca Aj Río Verde, en el municipio de Río Verde, San Luis Potosí (21° 59' 16.98" N, 99° 48' 34.84" O; elevación de 1 065 m). En la figura 1 se muestra la ubicación orográfica de la zona de muestreo, donde se puede notar que está anidada en la planicie de una cuenca cerrada, que colinda con la Sierra Madre Oriental, al poniente entre las sierras de Álvarez y el Tablón, y al oriente con la Sierra de Cárdenas y la Sierra de Ciudad del Maíz. La zona se consideró representativa de cuencas con drenaje ineficiente con sedimentos salinos, al estar cerrada y carecer de grandes corrientes superficiales, lo que conlleva a la acumulación de sedimentos. La topografía del valle Río Verde se conforma de limos, arenas, gravas y arcillas debido a la acumulación de sedimentos (Noyola-Medrano *et al.*, 2009). La zona de estudio presenta una radiación promedio anual de 6.3 h-pico/día.



Figura 1. Ubicación orográfica de la zona de muestreo.

Muestreo en campo

El pH y el SDT se determinaron por triplicado de agua cruda en campo. Para esto se utilizó un medidor marca Orion, modelo 420a, con una incertidumbre de 0.5%. El pH fue de 6.95 y el contenido de SDT máximo fue de 2 195.0 mg/l (CE = 3 430 $\mu\text{S}/\text{cm}^2$). En el cuadro 1 se muestra el contenido de iones y cationes, determinados en laboratorio, de acuerdo con el EPA 60-10C (2007), NOM-117 SSA1 (1994) y el procedimiento descrito en el Manual del Colorímetro (HACH/DR 890, 2013), donde se observa que el contenido de aniones de sulfatos excede de forma considerable lo recomendado para el riego, irrigación o ferti-irrigación; con esto, el RAS resultó con un valor relativamente alto de 11.4, indicando muy alta salinidad y alto contenido de sodio, como se ha venido caracterizando en diferentes trabajos, como el de Silva *et al.* (2014), entre otros.

Muestra de agua sintética

En el estudio se prepararon dos muestras de agua sintética a partir de agua de pozo libre de cloro (pozo del Instituto Mexicano de Tecnolo-

gía del Agua (IMTA), 18° 53' 03.16'' N, 99° 09' 34.37'' O; altitud de 1 363 m), adicionada con NaCl y CaSO_4 y sulfato de sodio. La salinidad de las muestras cubre el intervalo de salinidad (CE) existente en los acuíferos de la zona de estudio (Piña-Soberanis & Calderón-Mólgora, 2008). La muestra A presentó un pH de 7.86; los SDT, 1 107 mg/l (CE = 2 080 $\mu\text{S}/\text{cm}$); los sulfatos, 520 mg/l (iones divalentes), y los cloruros fueron de 288 mg/l (iones monovalentes). La muestra B presentó pH de 8.54; los SDT, 1 843 mg/l (CE = 3 690 $\mu\text{S}/\text{cm}$); los sulfatos resultaron de 740 mg/l, mientras que los cloruros fueron de 626 mg/l. Las muestras A y B se caracterizaron de la misma forma que las muestras tomadas en campo.

Método

El método para el tratamiento del agua y para la evaluación de viabilidad de la tecnología inició determinando la calidad del agua cruda, en términos de los SDT/CE (indicador de salinidad), pH y RAS (indicador de riesgo sódico), así como también del contenido de aniones y cationes. Con estos parámetros se identifican los componentes críticos de las muestras. Esto permitió

Cuadro 1. Propiedades químicas de la muestra tomada en campo. La tolerancia se presenta de acuerdo con CAPMA-UE (2012).

	Elementos	Contenido	Tolerancia	Unidades
Cationes	Na	207.53	< 180	mg/l
	Mg	105.24	< 58	mg/l
	Ca	546.78	-	mg/l
	K	39.81	< 54	mg/l
Aniones	Cl ⁻	87.8	150-355	mg/l
	SO ₄ ⁻²	1 863	< 371	mg/l
	Ca CO ₃	162	-	mg/l
	N-NO ₃	1.15	<32.3	mg/l
RAS	--	11.4	< 10	--

seleccionar la estrategia para su tratamiento. El sistema de tratamiento propuesto se evaluó en condiciones de laboratorio con las muestras sintéticas y después se probó su funcionalidad en campo. La evaluación del desalinizador consiste en determinar: a) la eficiencia de remoción de sulfatos y de SDT/CE; b) energía específica; c) productividad, y d) capacidad del sistema para ser operado por parte de los usuarios en campo (operatividad del sistema).

Calidad del agua y tratamiento

La calidad del agua para riego se identifica en función de la salinidad en términos de los SDT y del riesgo sódico en términos de la razón de absorción de sodio (RAS). El RAS se evalúa con el contenido de cationes de sodio, calcio y magnesio, utilizando la ecuación (1), como se reporta en Richards (1982) y Silva *et al.* (2014):

$$RAS = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}} \quad (1)$$

Los niveles de cationes y aniones de la muestra tomada en campo mostraron que el contenido de SO₄⁻² (1 863 mg/l) excede de forma notoria los valores de referencia para considerarla para riego agrícola (502%), esto de acuerdo con la CNA (2009) y la NOM-001-ECOL-1996. Considerando que los sulfatos, iones divalentes son los que en mayor medida adicionan salinidad al agua, y que el resto de

los componentes resulta poco desviado de los valores de referencia, entonces se optó por el tratamiento mediante NF, ya que usualmente se utiliza para la remoción de iones divalentes y permite operar el sistema a una relativa baja presión, con lo que se logra reducir también la robustez del sistema de bombeo solar.

Desempeño del desalinizador

Los experimentos se llevaron a cabo a cielo abierto tanto en el laboratorio como en campo. La eficiencia de remoción de SO₄⁻² se determina a una insolación de 750-1 000 W/m², bajo condiciones de cielo claro y nublado, relacionando el contenido en las muestras antes y después del tratamiento. La eficiencia de remoción de SDT, la energía específica (EE) y la productividad se determinan a diferentes irradiaciones incidentes en el plano de los módulos fotovoltaicos (MFV), desde la necesaria para que el sistema funcione hasta los 1 000 W/m² en promedio, a intervalos de 100 W/m² en promedio. Para esto, las diferentes variables se registran y promedian series de 8 a 12 datos experimentales para cada irradiación; en seguida se analizan los datos por grupos, dependiendo de la irradiación.

La energía específica *EE* para cada irradiación *G*, en el plano de los MF, se determina relacionando la potencia eléctrica suministrada al sistema de bombeo (a circuito cerrado) con el flujo del permeado o productividad de acuerdo con la ecuación (2):

$$EE(G) = \frac{f_p(G)}{P_{bfv}(G)} \quad (2)$$

donde el $f_p(G)$ es el flujo másico del permeado promedio en una hora, a una insolación, y la potencia eléctrica promedio suministrada al sistema de bombeo en la misma hora, $P_{bfv}(G)$. La potencia se obtiene multiplicando el voltaje (V_{fv}) por el amperaje (I_{fv}) suministrados a la bomba hidráulica.

El funcionamiento del sistema se verifica con su instalación y puesta en operación en campo, evaluando la eficiencia de remoción de SDT, productividad horaria y operatividad. La operatividad se determina con el número de asistencias técnicas por parte de personal calificado para su restablecimiento en relación con el tiempo de operación en campo (en la unidad agrícola).

Desalinizador solar

Una vez determinadas las sustancias críticas del agua cruda y contemplando viable la NF-

FV-BP, el sistema se desarrolló para tratar agua salobre con alto contenido de sulfatos (SO_4^{-2}), reduciendo el ensuciamiento de la membrana de NF con una alta relación de rechazo-permeado. En el diseño del sistema se contempló su funcionamiento a baja presión, no-almacenamiento eléctrico, acoplamiento directo de la planta solar fotovoltaica con la bomba hidráulica; esto, para hacer menos robusto el sistema e incrementar la viabilidad de ser operado por agricultores en campo.

En las figuras 2 y 3 se muestra un diagrama de la configuración y una fotografía del sistema, respectivamente. El desalinizador está compuesto por un sistema de micro filtrado, uno de NF y un sistema de bombeo fotovoltaico (SBFV). El sistema de nanofiltración (SNF) tiene capacidad de permeado de 0.2 l/s (12 l/min), con un suministro de agua salobre de 60 l/min, relación 1:5 de permeado-suministro, con cuatro membranas de poliamida (modelo ESNA1-LF-4040) dispuestas en un arreglo en paralelo, con un área equivalente total de 30.6 m². El SBFV consta de una planta fotovoltaica con una potencia nominal del SFV de 1.92 kW con ocho módulos

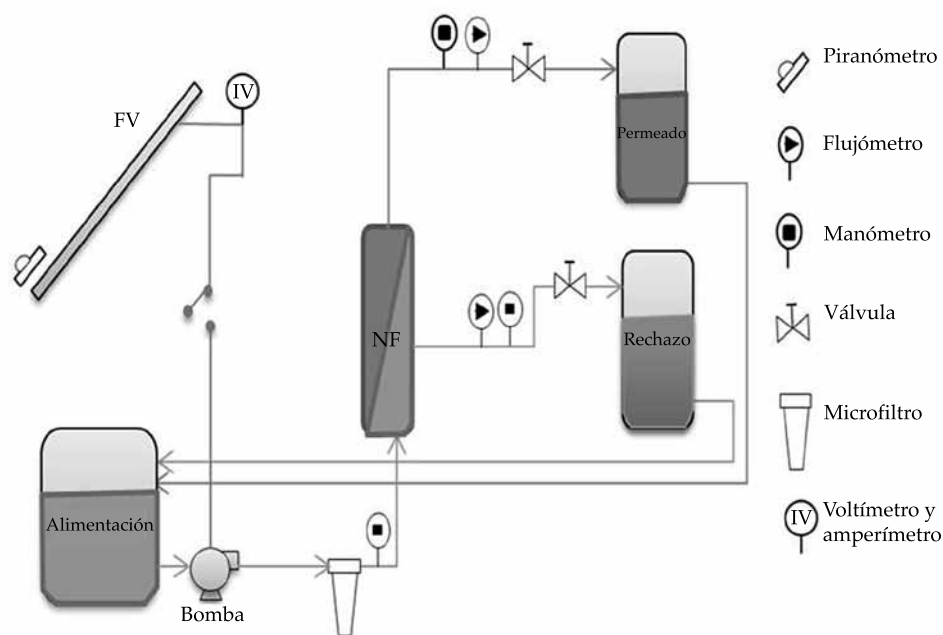


Figura 2. Diagrama experimental.



Figura 3. Equipo experimental en laboratorio.

de silicio policristalino con potencia nominal de 240 W cada uno, que suministra potencia a una bomba sumergible centrífuga, modelo SQFlex 16 SQF-10. De acuerdo con el fabricante, la bomba opera en el intervalo de 30 a 300 VDC, siendo más óptima a medida que se acerca a los 300 VDC por arriba de los 100 VDC. El SBFV puede suministrar agua con una potencia de hasta 1.42 kW. El acoplamiento de la planta fotovoltaica con la bomba es directo y se controla sólo con un interruptor encendido-apagado y con la potencia que entrega la planta solar a la bomba hidráulica. En el acoplamiento de la planta fotovoltaica con la bomba se maximizó el voltaje de salida de los módulos, conectándolos en una cadena en serie, con una salida de voltaje máxima de 240 VDC.

En lo que respecta a la hidráulica, en condiciones de laboratorio se utilizaron tres tanques de almacenamiento para lograr un recirculado continuo del suministro, rechazo y permeado de 0.6 y 1.1 m³. Por otro lado, en condiciones de

campo, el permeado se depositó en un tanque de almacenamiento de 500 m³ para su posterior uso en riego agrícola, mientras que el tanque de alimentación, también de 500 m³, se alimenta con agua cruda bombeada de un pozo, esto permitió que el cambio en el contenido de sólidos disueltos totales fuera mínimo.

Instrumentación

La irradiación se determinó con un piranómetro Eppley de primera clase, en el plano de los MFV, con una incertidumbre de $\pm 1.0\%$. El flujo volumétrico se determinó por duplicado, utilizando volumetría, con una incertidumbre de 0.1 l/min, y un medidor de flujo con resolución de 0.25 l/min. El voltaje y amperaje se midieron con multímetros de 4.5 dígitos. La temperatura se midió con termopar tipo T, con una incertidumbre de ± 0.5 °C, y la presión hidráulica con manómetros con resolución de 0.025 bar.

Resultados y discusión

Las pruebas en laboratorio se realizaron del 26 de septiembre al 11 de octubre de 2013, en Jiutepec, Morelos, México, mientras que las pruebas en campo fueron del 19 de octubre de 2013 al 15 de febrero de 2014, en el municipio de Río Verde, San Luis Potosí, México.

Pruebas en laboratorio

Durante la campaña experimental en laboratorio se presentaron potencias radiativas solares en el plano de los MFV en el intervalo de 60 a 1 040 W/m², esto debido principalmente a la variación natural de la radiación solar y a la presencia de nubes.

Calidad del agua

En la evaluación, a irradiación de 750 a 1 000 W/m², entre el límite alto y bajo de salinidad (de 2 080 a 3 690 µS/cm), se observó que los SDT se redujeron en promedio 75.15%, con una variación de 0.4%; los SO₄⁻², en 98.21% en promedio, con variación de 0.7%, y los Cl⁻ en 55.16% en promedio, con variación de 8.9%, tal como se muestra en el cuadro 2. En el intervalo de estudio se puede observar que el porcentaje de remoción de SDT y de sulfatos prácticamente no depende del contenido inicial del agua cruda.

Los porcentajes de remoción de moléculas polivalentes obtenidos resultaron consistentes con lo reportado por Izadpanah y Javidnia (2012).

En la figura 4 se muestra el comportamiento de la eficiencia de remoción de SDT y la presión de suministro de la bomba para la muestra A, donde se puede notar que ambos aumentan conforme lo hace la irradiación. La eficiencia de remoción de SDT varió de 65.2 a 75.6% en el intervalo de la variación natural de la irradiación en el plano de los MFV (de 60 a 1 050 W/m²), y la presión hidráulica de 0.12 a 0.49 bar. El intervalo de la presión de trabajo acentúa la viabilidad de que la NF-FV sea operada por productores en zonas aisladas, pues el sistema puede utilizar una bomba hidráulica común sin requerimientos especiales de presión.

Desempeño energético

En las pruebas en laboratorio se observó que el sistema de tratamiento inicia su funcionamiento con una disponibilidad 124 W suministrados a la bomba hidráulica, equivalentes a irradiación de 60 W/m², con producción de 0.15 m³/h a una EE de 1.30 kWh/m³. En el intervalo de 60 a 750 W/m², el f_p y la EE se incrementan prácticamente de manera lineal con la irradiación, tal como se muestra en la figura 5. Es de observar que el flujo del permeado tiene un cambio de 80% y la EE de 34%. A irradiaciones mayores

Cuadro 2. Calidad de agua (salinidad) en pruebas de laboratorio.

	Unidades	Suministro	Rechazo	Permeado	Eficiencia (%)
Muestra A: límite de salinidad baja					
pH	---	7.86	7.91	7.49	---
CE	µS/cm	2 080	5 890	531	74.47
TDS	mg/l	1 107	3 007	282	74.56
SO ₄ ⁻²	mg/l	520	1 900	13	97.50
Cl ⁻	mg/l	288	800	115	60.07
Muestra B: límite de salinidad alta					
pH	----	8.54	8.48	8.74	----
CE	µS/cm	3 690	4 140	892	75.83
TDS	mg/l	1 843	2 090	446	75.80
SO ₄ ⁻²	mg/l	740	880	8	98.92
Cl ⁻	mg/l	626	698	312	50.16

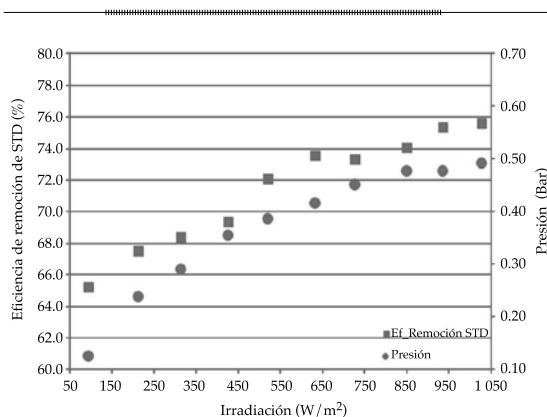


Figura 4. Eficiencia de desalinización (SDT) y presión de suministro de la bomba *vs.* irradiancia para la muestra A.

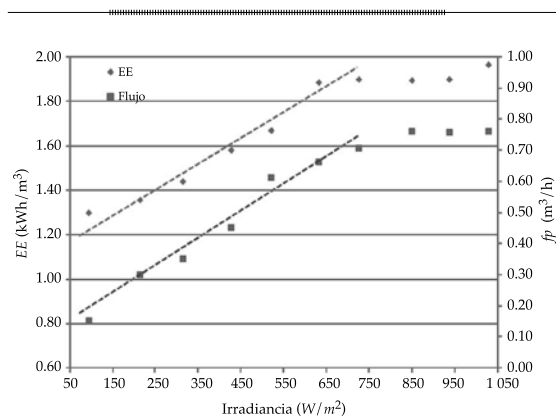


Figura 5. Energía específica y permeado *vs.* irradiancia.

o iguales que 750 W/m^2 , el sistema muestra que el f_p y la EE no se incrementan más de $0.76 \text{ m}^3/\text{h}$ y $1.94 \pm 0.04 \text{ kWh/m}^3$, respectivamente. Los valores máximos de la productividad o flujo del permeado y de la EE se presentan a consecuencia del límite de la potencia máxima de la bomba hidráulica (1.42 kW), ya que por arriba de esta potencia, el sistema de control de la bomba hidráulica drena la energía que entregan los MFV a un circuito de resistencia y no se cuantifica, esto con el fin de proteger de sobrecargas la bomba hidráulica.

Las correlaciones lineales de la EE y del f_p con la irradiancia en el plano de los MFV se muestran en las ecuaciones (4) y (5), respectivamente, que presentaron un error estándar de estimación de 0.25 kWh/m^3 y $0.20 \text{ m}^3/\text{h}$, con un índice de confiabilidad R^2 de 0.9694 y 0.9797 .

$$\begin{aligned} EE &= 1 \times 10^{-3}G + 1.1511 \text{ kWh/m}^3 & 60 \leq G(\theta) \leq 750 \\ EE &= 1.94 \text{ kWh/m}^3 & G(\theta) \geq 750 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} f_p &= 9 \times 10^{-4}G + 0.085 \text{ m}^3/\text{h} & 100 \leq G(\theta) \leq 750 \\ f_p &= 0.76 \text{ m}^3/\text{h} & G(\theta) \geq 750 \end{aligned} \quad (4)$$

Operación en campo

El sistema se instaló en campo y se puso en operación el 19 de octubre de 2013. Para el 15 de

febrero de 2014, el funcionamiento continuaba siendo adecuado. Las pruebas de funcionamiento en campo se registraron a insolación igual o mayor que 750 W/m^2 en el plano de los MFV. En el cuadro 3 se muestran los resultados de la calidad del agua permeada en las pruebas en campo. Los valores de la EE evaluados en campo resultaron concordantes con los obtenidos en laboratorio, con una diferencia de sólo 8.2% , que puede ser atribuida a la diferencia en las caídas de presión en las instalaciones hidráulicas.

A irradiaciones iguales o mayores de 750 W/m^2 , a la potencia máxima de la bomba hidráulica (1.42 kW), los sulfatos se redujeron en 97.8% (de 1863 a 40.99 mg/l), con una eficiencia de remoción promedio de STD de 76.7% (de 2195 a 510.1 mg/l), ello resultó concordante con lo reportado por Izadpanah y Javidnia (2012). Para esto se trabajó a una presión hidráulica de 0.49 bar , entregando permeado a razón de 0.6 a $0.66 \text{ m}^3/\text{h}$, con un valor de EE de 2.1 kWh/m^3 . Con este desempeño, la productividad diaria resultó de $3.2 \text{ m}^3/\text{día}$, con insolaciones promedio de 6.3 kWh/día , en la zona de estudio, lo que permite cultivar hasta 15 toneladas de tomate a una conservadora tasa de 35 kg/m^3 , en un ciclo de 137 días, utilizando tecnología de invernadero con hidroponía, como se reporta en Flores, Ojeda-Bustamante, López, Rojano y Salazar (2007).

Cuadro 3. Calidad de agua de pruebas campo.

	Unidades	Suministro	Permeado	Eficiencia (%)
SO ₄ ⁻²	mg/l	1 863	40.99	97.8
TDS	mg/l	2 195	510.1	76.76
RAS	---	11.5	16.4	---
Na	mg/l	207.53	45.27	78.19
Ca	mg/l	546.78	12.7	97.68
Mg	mg/l	105.24	3.1	97.05

En el periodo de prueba en campo se requirió sólo una asistencia técnica. La asistencia se debió al ensuciamiento del filtro (*fouling*) del sistema de pre filtrado debido a crecimiento considerable de algas en el tanque de suministro. Así, se reubicó la bomba en el contenedor del agua salobre de suministro. Considerando que el paro del sistema se debió a imprevisiones en la estrategia de instalación, entonces se asume que el sistema en un periodo de prueba (octubre-febrero) funcionó sin requerimientos de asistencia especializada.

De acuerdo con el cuadro 3, considerando el riesgo sódico, en términos del RAS, la NF elimina en mayor medida los iones de Ca y el Mg por tener mayor afinidad con los sulfatos, mientras que el ion Na, por su afinidad con los cloruros, se elimina en menor porcentaje. Lo anterior es causa de que el RAS se incrementa, de 11.5 a 16.5, sólo que en concentraciones menores de Na, dando lugar a una posible remineralización sólo con Ca y Mg para evitar el daño sódico. La remineralización debe hacerse con base en los requerimientos de cada cultivo y tipo de suelo; puede realizarse mezclando el permeado con agua cruda o con sustancias que aporten Ca y/o Mg, como la cal apagada, Ca(OH)₂, y/o fertilizantes con contenido de Mg en las proporciones requeridas.

Con lo anterior, considerando la calidad del permeado, costos energéticos, productividad y operatividad del sistema, se observa que la NF-FV-BP puede ser una alternativa para tratamiento de agua con alto contenido de sulfatos para la irrigación, misma que se puede aplicar en regiones aisladas/marginadas, que es donde

mayormente se requiere. Esto puede hacerse con apoyo de tecnología de riego como acolchado plástico y malla-sombra, o bien en invernaderos en condiciones de hidroponía, para maximizar el aprovechamiento del agua en los cultivos.

Conclusiones

En este trabajo se presenta una alternativa de tratamiento de agua salobre con alto contenido de sulfatos con NF-FV-BP, como alternativa para riego agrícola, a fin de habilitar tierras ubicadas en cuencas con drenajes ineficientes, que en términos agrícolas no son productivas en la actualidad.

En el límite alto y bajo de salinidad (de 2 080 a 3 690 µS/cm), a irradiación de 750 a 1 000 W/m², se observó que los SDT se redujeron en promedio 75.15% y los SO₄⁻² 98.21%, con variación mínima, mientras que los Cl⁻ aniones monovalentes se redujeron 55.16%, con variación de 8.9%. La variación natural de la insolación, entre 60 y 1 040 W/m², provoca cambios en la remoción de SDT hasta de 11.5%.

El flujo del permeado y la EE presentan valores máximos de 0.76 m³/h y de 1.94 ± 0.04 kWh/m³, respectivamente, para irradiaciones mayores o iguales que 750 W/m²; para valores inferiores decrece linealmente con la irradiación. La EE varía 32%, mientras que el flujo del permeado 80% en el intervalo de irradiación de 60 a 750 W/m². La presión de operación varió de 0.12 a 0.49 bar con la irradiación, con un perfil que se puede considerar lineal en el intervalo, donde el SFV no logra suministrar la potencia nominal de la bomba. Una vez que entrega o sobrepasa la

potencia nominal de la bomba, la EE se establece en 1.94 kWh/m³. Se pudo observar que incluso trabajando a relativa baja presión, el sistema puede funcionar y no es estricto el requerimiento de tecnología especializada para el bombeo hidráulico, pudiendo lograrse con una bomba hidráulica común, tipo centrífuga, impulsada con energía solar FV.

El sistema de desalinización de agua salobre NF-FV-BP es una alternativa para potenciar la productividad agrícola en tierras con mantos salinos, como sucede por lo común en cuencas con drenajes ineficientes. Esto después de observar que el requerimiento de presión hidráulica (de 0.12 a 0.49 bar) puede ser suministrado con una bomba convencional tipo centrífuga y la operatividad del sistema por parte de usuarios, sin requerimiento de asistencia técnica especializada durante cuatro meses.

El desalinizador permite obtener en promedio 3.2 m³/día, considerando 6.3 h-pico solares en la zona de estudio, lo que permite cultivar en la región de estudio hasta 15 toneladas de tomate a una tasa de 35 kg/m³, en un ciclo de 137 días con tecnología de invernadero e hidroponía, como se reporta en Flores et al. (2007). La determinación de la EE, flujo del permeado y eficiencia de remoción de SDT en función de la irradiación permite dimensionar el sistema con menor incertidumbre.

Estudios futuros en este tema deben ir encaminados a la optimización energética del sistema, dependiendo del recurso solar disponible y de las capacidades aprovechables de los componentes del SBFV, optimando el acoplamiento MF-bomba hidráulica de acuerdo con el punto de máxima potencia. También es de observar que el agua de rechazo es considerablemente contaminante, por lo que futuros trabajos deben contemplar su tratamiento.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Zacatecas su colaboración en la logística para la realización del proyecto y al Centro de Producción Santa Rita, S.A. de C.V., por todas sus facilidades para la realización de las pruebas en campo.

Referencias

- CAPMA-UE (2012). *Gestión sostenible de aguas residuales urbanas en los cultivos hortícolas*. Consultado el 03/08/2015.
- Consejería de Agricultura Pesca y Medio Ambiente de la Unión Europea. Recuperado de <http://www.juntadeandalucia.es/agriculturaypesca/portal/>.
- CNA (2009). *Ley Federal de Derechos en Materia de Agua*. México, DF: Comisión Nacional del Agua. Consultado el 03/08/2015. Recuperado de www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Noticias/LeyFederaldeDerechos.pdf.
- Dévora-Isiordia, G. E., González-Enríquez, R., & Ruiz-Cruz, S. (2013). Evaluación de procesos de desalinización y su desarrollo en México. *Water Technology and Sciences*, 4(3), 27-46.
- Flores, J., Ojeda-Bustamante, W., López, I., Rojano, A., & Salazar, I. (2007). Requerimientos de riego para tomate de invernadero. *TERRA Latinoamericana*, 25(2), 127-134.
- Ghermandi, A., & Messalem, R. (2009). The Advantages of NF Desalination of Brackish Water for Sustainable Irrigation: The Case of the Arava Valley in Israel. *Desalination and Water Treatment*, 10, 101-107.
- HACH/DR 890 (2013). *Colorimeter Procedures Manual*. Hach Company. Consultado el 03/July/2015. Recuperado de <http://www.hach.com/dr-890-portable-colorimeter/product-downloads?id=7640439041>.
- Hrayshat, E. S. (2008). Brackish Water Desalination by a Standalone Reverse Osmosis Desalination Unit Powered by Photovoltaic Solar Energy. *Renewable Energy*, 33, 1784-1790.
- Isaka, M. (2012). *Water Desalination Using Renewable Energy*. Technology Brief I12. IEA-ETSAP and IRENA. Consultado el 03/July/2015. Recuperado de https://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA-ETSAP_Tech_Brief_I12_Water-Desalination.pdf.
- Izadpanah, A. A., & Javidnia, A. (2012). The Ability of a Nanofiltration Membrane to Remove Hardness and Ions from Diluted Seawater. *Water*, 4, 283-294.
- Kaldellis, J. K., Meidanis, E., & Zafirakis, D. (2011). Experimental Energy Analysis of a Stand-Alone Photovoltaic-Based Water Pumping Installation. *Applied Energy*, 88, 4556-4562.
- Koyuncu, I., Yazgan, M., Topacik, D., & Sarikaya, H. Z. (2001). Evaluation of the Low Pressure RO and NF Membranes for an Alternative Treatment of Buyukcekmece Lake Water. *Science and Technology, Water Supply* © IWA Publishing, 1(1), 107-115.
- Leo, C. P., Yahya, M. Z., Kamal, S. N., Ahmad, A. L., & Mohammad, A. W. (2013). Potential of Nanofiltration and Low Pressure Reverse Osmosis in the Removal of Phosphorus for Aquaculture. *Water Science and Technology*, 67(4), 831-837.
- Ludwig, H. (2010). Energy Consumption of Reverse Osmosis Seawater Desalination — Possibilities for Its

- Optimization in Design and Operation of SWRO Plants. *Desalination and Water Treatment*, 13, 13-25.
- Mac-Harg, J. P. (2011). *Energy Optimization of Brackish Groundwater Reverse Osmosis Desalination. Final Report for Contract Number 08048308452011* (pp. 1-12). Austin, USA: Texas Water Development Board, .
- Noyola-Medrano, M. C., Ramos-Leal, J. A., Domínguez-Mariani, E., Pineda-Martínez, H., López-Loera, H., & Carbajal, N. (2009). Factores que dan origen al minado de acuíferos en ambientes áridos: caso Valle de San Luis Potosí. *Rev. Mexicana Ciencias Geológicas*, 26(2), 395-410.
- NOM-117 SSA1 (1994). *Bienes y servicios. Método de prueba para la determinación de del Cadmio, arsénico, plomo, estaño, cobre, fierro, zinc y mercurio en alimentos, agua potable y agua purificada por espectrometría de absorción atómica*.
- NOM-001-ECOL-1996 (1996). *Máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales a aguas y bienes nacionales*.
- Ontiveros-Capurata, R. E., Diakite-Diakite, L., Álvarez-Sánchez, M. E., & Coras-Merino, P. M. (2013). Evaluación de aguas residuales de la ciudad de México utilizadas para riego. *Water Technology and Sciences*, 4(3), 127-140.
- Oosterbaan, R. J. (1995). Land Drainage and Soil Salinity: Some Mexican Experiences (pp. 44-52). In *Annual Report 1995*. Wageningen, The Netherlands: International Institute for Land Reclamation and Improvement.
- Pontié, M., Dach, H., Leparç, J., Hafsi, M., & Lhassani, A. (2008). Novel Approach Combining Physico-Chemical Characterizations and Mass Transfer Modelling of Nanofiltration and Low Pressure Reverse Osmosis Membranes for Brackish Water Desalination Intensification. *Desalination*, 221, 174-191.
- Phuntsho, S., Shona, H. K., Hongb, S., Leeb, S., & Vigneswarana, S. A. (2011). Novel Low Energy Fertilizer Driven Forward Osmosis Desalination for Direct Fertigation: Evaluating the Performance of Fertilizer Draw Solutions. *Journal of Membrane Science*, 375, 172-181.
- Phuntsho, S., Hong, S., Elimelech, M., & Shon, H. K. (2013). Forward Osmosis Desalination of Brackish Ground Water: Meeting Water Quality Requirements for Fertirrigation by Integrating Nanofiltration. *Journal of Membrane Science*, 436, 1-15.
- Piña-Soberanis, M., & Calderón-Mólgora, C. (2008). *Alternativas de tratabilidad para desmineralización del agua destinada al riego en invernaderos*. Informe IMTA TC-0740.3. Jiutepec, México: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Pulido-Madrugal, L. (1996). *Estudio general de salinidad analizada*. Anexo Técnico. México, DF: CNA-IMTA.
- Richards, B. S., & Schäfer, A. I. (2003). Photovoltaic-Powered Desalination System for Remote Australian Communities. *Renewable Energy*, 28, 2013-2022.
- Richards, I. A. (1982). *Manual de agricultura número 60*. Washington, DC: USDA.
- Richards, L. A., Richards, B. S., & Schäfer, A. I. (2011). Renewable Energy Powered Membrane Technology: Salt and Inorganic Contaminant Removal by Nanofiltration/Reverse Osmosis. *Journal of Membrane Science*, 369, 188-195.
- Schäfer, A. I., Broeckmann, A., & Richards, B. S. (2005). Membranes and Renewable Energy—A New Era of Sustainable Development for Developing Countries. *Membrane Technology*, 11, 6-10.
- Shaffer, D. L., Yip, N. Y., Jack, G. J., & Elimelech, M. (2012). Seawater Desalination for Agriculture by Integrated Forward and Reverse Osmosis: Improved Product Water Quality for Potentially Less Energy. *Journal of Membrane Science*, 415-416, 1-8.
- Silva, J. T., Moncayo, R., Ochoa, S., Estrada, F., Cruz-Cárdenas, G., Escalera, C., Villalpando, F., & Nava, J. (2013). Calidad química del agua subterránea y superficial de la cuenca del río Duero, Michoacán. *Water Technology and Sciences*, 4(5), 127-144.
- Werner, M., & Schäfer, A. I. (2007). Social Aspects of a Solar-Powered Desalination Unit for Remote Australian Communities. *Desalination*, 203, 375-393.
- Yu, Y., Liu, J., Wang, H., & Liu, M. (2011). Assess the Potential of Solar Irrigation Systems for Sustaining Pasture Lands in Arid Regions –A Case Study in Northwestern China. *Applied Energy*, 88, 3176-3182.

Dirección institucional de los autores

Dr. José Jassón Flores Prieto

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Departamento de Ingeniería Mecánica
Int. Internado Palmira s/n, Col. Palmira
62490 Cuernavaca, Morelos, MÉXICO
Teléfono: +52 (777) 3627 770, extensión 1302
jasson@cenidet.edu.mx

Dr. J. Javier Ramírez Luna

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Subcoordinación de Cuencas y Tecnología Forestal
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO
Teléfono: +52 (777) 3293 600, extensión 460
jramirez@tlaloc.imta.mx

M.I. César G. Calderón Mólgora

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua
Coordinación de Tratamiento y Calidad del Agua
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO
Teléfono: +52 (777) 3293 600, extensión 288
calderon@tlaloc.imta.mx;

Ing. Delgado Quezada Emir

Subcoordinación de Cuencas y Tecnología Forestal
Paseo Cuauhnáhuac 8532, Col. Progreso
62550 Jiutepec, Morelos, MÉXICO
Teléfono: +52 (777) 3293 600, extensión 460
edelgado@tlaloc.imta.mx

Ing. Morales-García Alan de Jesús

Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez
Carretera Panamericana km. 1080
29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, MÉXICO
Teléfono: +52 (961) 6157 441
dragonx_90@hotmail.com