

## **LIFE+13 TRANSFOMEM: validación de membranas recicladas en procesos de filtración a media y baja presión**

**Autores:** Patricia Terrero Rodríguez (Departamento I+D+i, Sacyr Servicios Agua, pterrero@sacyr.com), Raquel García Pacheco (Investigadora, IMDEA Agua, raquel.pacheco@imdea.org), Elena Campos Pozuelo (Departamento I+D+i, VALORIZA AGUA, ecamposp@sacyr.com), Francisco Molina (Jefe de planta, Sacyr Servicios Agua, fmolina@sacyr.com), Deborah Pomata (UTE Marina Baja, dpomata@sacyr.com), Jorge Senán Salinas (Técnico de Apoyo, IMDEA AGUA, jorge.senan@imdea.org), Manuel López (Investigador, IMDEA Agua, manuel.lopez@imdea.org), Mercedes Calzada (Departamento I+D+i, Sacyr Servicios Agua, macalzada@sacyr.com), Diego Martínez (Operario de planta, Sacyr Servicios Agua, drmartinez@sacyr.com), Junkal Landaburu (Investigadora, IMDEA AGUA, junkal.landaburu@imdea.org), Domingo Zarzo (Director Técnico y de I+D+i, Sacyr Servicios Agua, dzarzo@sacyr.com), Eloy García-Calvo (Director, IMDEA Agua, eloy.garcia@imdea.org)

### **Resumen:**

Según datos de la Asociación Internacional de Desalación, en el mundo más del 65% (>56 Hm<sup>3</sup>/día) de la capacidad instalada en desalación a nivel mundial corresponde a membranas de ósmosis inversa (OI) [1]. Sin embargo, la gestión de los módulos de membranas desechados es todavía un reto a afrontar para cumplir con los términos de desarrollo sostenible. Como alternativa a la gestión actual (vertedero), el proyecto Life-Transfomem, ha desarrollado un proceso de reciclaje para transformar las propiedades de las membranas de OI desechadas a propiedades de nanofiltración (NF) y ultrafiltración (UF) [2]. Este trabajo se centra en investigar las propiedades filtrantes de las membranas recicladas a escala piloto, para 3 aplicaciones diferentes:

- **Pretratamiento de agua de mar** (desaladora de Mutxamel-El Campello): determinación de los procedimientos óptimos de operación de membranas recicladas de UF (modalidad dead-end con 20-30 LMH de filtración), limpieza y su capacidad de retención.
- **Tratamiento terciario de aguas residuales** (EDAR de Guadalajara): evaluación de 3 potenciales configuraciones de los módulos de membrana recicladas de UF, así como las condiciones óptimas de operación y su capacidad de rechazo de materia en suspensión y microbiológica (> 3 LRV). El agua tratada alcanza calidades recogidas en el RD.1602/2007 de reutilización de agua.
- **Tratamiento de agua salobre** (desalobrador de Cuevas de Almanzora): las membranas recicladas de nanofiltración instaladas en 2 tubos de presión (6 módulos por tubo) han sido monitorizadas durante más de un año de operación en condiciones de operación real y filtración continua (50% conversión sin aplicar limpiezas). Las membranas tienen una capacidad de rechazar iones comparables a modelos comerciales de membranas de NF, mientras que su permeabilidad es inferior.

Además, se ha estudiado el proceso del reciclaje desde una perspectiva económica y ambiental mediante metodología de análisis de ciclo de vida, resultando ser un proceso con alto margen de beneficio financiero (coste de membrana reciclada <2 €/m<sup>2</sup>) y ambiental (se evita entre 9-54 kg CO<sub>2</sub>/módulo en comparación con la fabricación de módulos de membrana nuevos)

### **Abstract:**

According to International Desalination Association, more than the 65% of the installed desalination capacity at worldwide scale correspond to reverse osmosis (RO) processes (>56 hm<sup>3</sup>/day) [1]. However, end-of-life membrane management is still a challenge to achieve the sustainable development goals. As an alternative

to the current management (landfill disposal), the European project Life-Transfomem developed a recycling protocol to transform the end-of-life RO performance into nanofiltration (NF) and ultrafiltration (UF) performance [2]. The main scope of this work is to investigate the performance of the recycled membranes at pilot scale in 3 different cases.

- **As pretreatment within seawater desalination process** (Mutxamel-El Campello desalination plant): determination of the optimal operational condition of the UF recycled membranes (dead-end configuration with 20-30 LMH flux), cleaning protocols and their retention capability.
- **Wastewater treatment** (Guadalajara Water Treatment Plant): evaluation of 3 potential module configuration of the recycled membranes. Investigation on optimal operation condition and the rejection coefficients (organic matter suspended and microbiological (>3 LRV E. coli removal). Treated water achieved the quality requirements of RD. 1602/2007 for water reuse.
- **Brackish water treatment** (Cuevas del Almanzora desalination plant): NF recycled membranes installed in 2 pressure tubes (holding 6 membranes per tube) have been monitored for more than a year at real condition (50% conversion without cleaning steps). Membranes have the capability to reject ion compounds within NF commercial membrane range, however permeability is lower in all cases.

In addition, the recycling process has been studied with an economical approach and environmental approach with life cycle assessment. Results are promising. Recycled membrane cost is under 2€/m<sup>2</sup> and save 9-54 kg CO<sub>2</sub>/module comparing to the production of new modules.

## 1 INTRODUCCIÓN

La gestión de los módulos de membrana al final de su vida útil sigue siendo un gran desafío para la sostenibilidad de la tecnología ósmosis inversa. Teniendo en cuenta el volumen actual de agua desalada producida por esta tecnología y considerando una tasa de reposición de membranas del 15%, se estima que anualmente más de 800.000 módulos de membranas de ósmosis inversa son desechados y depositados en vertedero a nivel mundial, siendo ésta la opción menos favorable en términos de impacto ambiental [3, 4].

Atendiendo a estas inquietudes medioambientales, nació el Proyecto Europeo LIFE13 ENV/ES/000751 TRANSFOMEM con el fin de aumentar la vida útil de las membranas de ósmosis inversa y mejorar la sostenibilidad de las tecnologías de membranas. El objetivo del proyecto es desarrollar una tecnología de reciclaje de membranas de ósmosis inversa al final de su vida útil obteniendo membranas recicladas de nanofiltración (NF) y ultrafiltración (UF). Una vez recicladas las membranas según el protocolo desarrollado y publicado por los autores [4, 5, 6], las membranas recicladas se han validado para su reutilización en procesos de tratamiento de aguas a baja presión. El presente estudio recoge los resultados de la validación de las membranas recicladas de NF y UF para su aplicación en 3 procesos diferentes: pretratamiento de agua de mar, tratamiento terciario de aguas residuales y tratamiento de agua salobre.

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Membranas recicladas

Se han recopilado membranas de ósmosis inversa desechadas que durante su vida útil estuvieron tratando agua de mar y agua salobre. Las membranas desechadas han sido recicladas según el protocolo publicado por los autores [4, 5, 6] para alcanzar propiedades de NF y/o UF. En la fase de validación de las membranas recicladas se han utilizado 5 modelos de membranas recicladas de agua de mar (*Recycled Seawater Membranes, RSWM*) y 5 modelos de membranas recicladas de agua salobre (*Recycled Brackish Water Membranes, RBWM*).

### 2.2 Reutilización de membranas recicladas de UF para el pretratamiento de agua de mar

La validación de las membranas recicladas de UF para su aplicación como pretratamiento para el proceso de ósmosis inversa de agua de mar se ha realizado en la Desaladora de Mutxamel-El Campello (Alicante).

Para el pretratamiento de agua de mar se ha utilizado el módulo de membrana en espiral manteniendo su configuración original y ubicada en un tubo de presión con capacidad de una única membrana. El modo de filtración adoptado ha sido *dead-end* (sin corriente de concentración). Se han aplicado flujos constantes de permeado de 20, 30, 40 y 50 LMH durante 10-40 h de tiempo de filtrado (para cada flujo), a temperatura constante de  $25 \pm 5$  °C, registrando continuamente la presión transmembrana (TMP).

Se han aplicado ciclos de limpieza (*backwash* y/o *forward flux*) considerando únicamente el tiempo de filtrado. Se han realizado limpiezas químicas con solución de hipoclorito una vez alcanzado un incremento de la TMP del 10-15% del valor inicial. Las limpiezas químicas realizadas han sido i) Retrolavado mejorado químicamente o *Chemical Enhanced Backwash* (CEB) y ii) Limpieza in situ o CIP (Cleaning In Place).

La calidad del agua de agua y del agua ultrafiltrada se ha determinado mediante el análisis del SDI, turbidez, TSS, TC, IC y conteo de partículas. Además, se ha realizado un análisis comparativo de los resultados con los datos reales del proceso de filtración de arena.



Figura 1. Planta piloto para la validación de membranas recicladas de UF para el pretratamiento de agua de mar

### 2.3 Reutilización de membranas recicladas de UF para el tratamiento terciario de aguas residuales

La validación de las membranas recicladas de UF para su aplicación como tratamiento de aguas residuales se ha realizado en la EDAR de Guadalajara.

Se han probado tres configuraciones de módulos diferentes: configuración en arrollamiento en espiral (manteniendo el módulo comercial), configuración semiabierta (eliminando algunos componentes de membranas tales como fibra de vidrio y lámina exterior de plástico) y configuración en estrella (una configuración completamente nueva que simula la configuración de membrana plana). En todos los casos el modo de filtración adoptado ha sido *dead-end*.



Figura 2. Planta piloto para la validación de membranas recicladas de UF como tratamiento terciario de aguas residuales.

Para cada configuración se han probado distintos ciclos de filtrado: a) Modo 1: filtrado de 9 minutos más 1 minuto de relajación con retrolavado, b) Modo 2: filtrado de 9 min más 1 minuto de relajación sin retrolavado, c) Modo 3: filtración continua durante 8 h más retrolavado seguido de filtración de 16 h más retrolavado, y d) Modo 4: filtración continua aumentando el contenido de materia orgánica para determinar el valor límite para cada configuración.

Se han aplicado ciclos de limpieza (*backwash* o retrolavado) con agua ultrafiltrada considerando únicamente el tiempo de filtrado. En el caso de la configuración semi-abierta y en estrella el backwash se ha realizado por gravedad, mientras que en la configuración en espiral se ha realizado un backwash presurizado. Además, se han realizado limpiezas químicas con solución de hipoclorito con distintos protocolos para determinar cuál es el más eficiente en cada configuración. Las limpiezas químicas realizadas han sido i) Retrolavado mejorado químicamente o *Chemical Enhanced Backwash* (CEB) y ii) Limpieza in situ o CIP (*Cleaning In Place*).

El caudal de agua ultrafiltrada y la presión de succión han sido registrados constantemente. Los valores de pH, conductividad y oxígeno disuelto se monitorearon diariamente mientras que puntualmente se tomaron muestras de agua para la determinación de sólidos suspendidos, turbidez, carbono total, demanda química de oxígeno, demanda biológica de oxígeno, cromatografía iónica, ICP, concentración de contaminantes emergentes y detección de bacterias.

## 2.4 Reutilización de membranas recicladas de NF para el tratamiento de agua salobre

La validación de las membranas recicladas de NF para su aplicación al tratamiento de agua salobre se ha realizado en la desaladora de la Comunidad de Regantes de Cuevas de Almanzora. Para ello se han adaptado dos tubos de presión para su operación con membranas recicladas, uno con 6 membranas recicladas de agua de mar (RSW membranes) y otro con 6 membranas recicladas de agua salobre (RBW membranes). Las membranas recicladas han estado en operación durante más de un año manteniendo las mismas condiciones de operación que los demás tubos del bastidor de primera etapa de la desalobradoradora.

Desde su puesta en marcha se han registrado diariamente los principales parámetros de operación de los tubos de presión (presión de alimentación, rechazo y permeado, conductividad del agua de alimentación, rechazo y permeado, y caudales de alimentación, rechazo y permeado). Además, se han realizado análisis iónicos periódicos en cada corriente.



*Figura 3. Tubos de presión adaptados para la validación de membranas recicladas de NF para el tratamiento de agua salobre.*

## 2.5 Análisis de ciclo de vida

La sustitución de las membranas comerciales por membranas recicladas se ha estudiado mediante metodología de análisis de ciclo de vida y con la categoría de potencial de calentamiento global (huella de carbono) [7]. Como unidad funcional se ha escogido 1 un módulo reciclado. Acorde con las recomendaciones de la ILCD el sistema se ha expandido con enfoque de sustitución [8]. Por lo que el balance del reciclaje (en este caso emisiones de CO<sub>2</sub>) es el impacto del proceso de reciclaje menos el impacto de la membrana de nueva manufacturación evitada (a la que sustituye). En orden de integrar factores técnicos se ha generado un factor de compensación basado en el ratio comparativo entre el módulo reciclado y el comercial de la vida útil, permeabilidad y área de superficie activa. Se ha asumido una vida útil de 5 años para las membranas recicladas a NF y de 3 años para las recicladas a UF. Respecto a las membranas comerciales se ha asumido una vida útil de 10 años. Los impactos del transporte y distribución de las membranas no han sido considerados. El impacto ha sido calculado con OpenLCA 1.63 y la base de datos Ecoinvent 3.4 [9].

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Membranas recicladas de UF para el pretratamiento de agua de mar

Se han validado 3 modelos de membranas recicladas de UF de agua de mar (RSW) y 3 modelos de membranas de agua salobre (RBW). La TMP necesaria para un determinado flujo constante varía en función del modelo de membrana. Para un mismo flujo de filtración, las membranas recicladas de agua de mar presentan una TMP superior (Figura 4), lo que se traduce en un mayor consumo energético. Las membranas recicladas de agua salobre presentan TMP inferiores, difiriendo su valor en función del modelo de membrana.

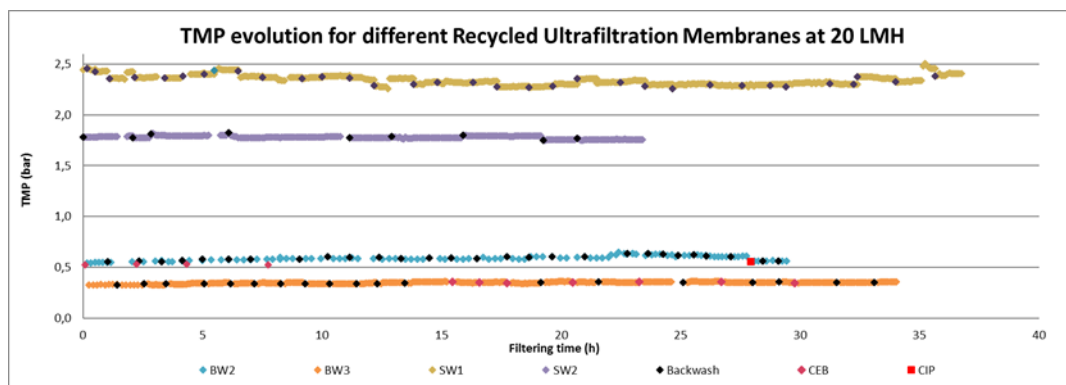


Figura 4. Evolución de la TMP a 20 LMH para distintos modelos de membranas recicladas.

Por otra parte, para cada modelo de membrana, se produce un incremento de la TMP al aumentar el flujo de filtración (Figura 6). Este comportamiento se observa tanto en los modelos de agua de mar como en los de agua salobre. Del mismo modo, al incrementar el flujo de operación se produce un mayor ensuciamiento, que se traduce en un incremento más acusado de la TMP.

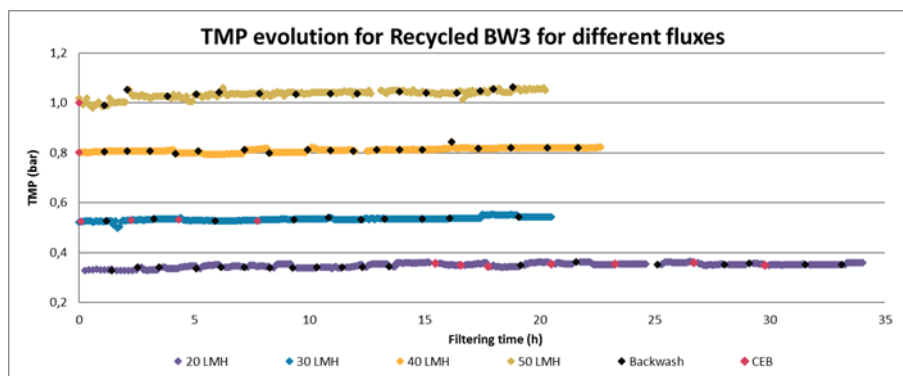


Figura 5. Comportamiento de una membrana reciclada de agua salobre. Evolución de la TMP para diferentes flujos de operación. .

En cuanto a la calidad del agua ultrafiltrada, el proceso de ultrafiltración con membranas recicladas permite obtener una disminución significativa de turbidez (50-100%), sólidos suspendidos (28-100%) y presencia de bacterias, en comparación con la alimentación de agua de mar, así como un SDI de 1,64-4,43.

### 3.2 Membranas recicladas de UF para el tratamiento terciario de aguas residuales

De entre todos los modos de funcionamiento estudiados, el óptimo fue, para todas las configuraciones, mantener un ciclo de filtración de 9 min más 1 min de relajación (sin retrolavado) o la filtración continua durante un período máximo de 16 h.

El caudal de permeado obtenido varió entre 1 y 0.3 m<sup>3</sup>/h (8-27 LMH). Las membranas recicladas de agua salobre presentaron flujos mayores que las membranas recicladas de agua de mar. La Figura 6 muestra los resultados obtenidos (flujo de permeado y TMP) usando la configuración de espiral, semiabierta y en estrella para una membrana reciclada de UF de agua salobre. A pesar de que no se realizaron limpiezas o retrolavados continuos, el flujo de permeado desciende rápidamente a causa del ensuciamiento pero se mantuvo constante durante horas de operación. En cuanto a los protocolos de limpieza cíclicos, no hubo diferencias significativas entre el *backwash* con agua ultrafiltrada sin y con adición de hipoclorito sódico. En cuanto a las distintas configuraciones estudiadas, la membrana en arrollamiento en espiral (configuración comercial) presenta mayores ventajas ya que conserva su resistencia mecánica, presenta una vida útil notablemente superior y, además, permite aumentar la densidad de módulos instalados. Sin embargo, esta configuración es la que mayor tendencia al ensuciamiento presenta.

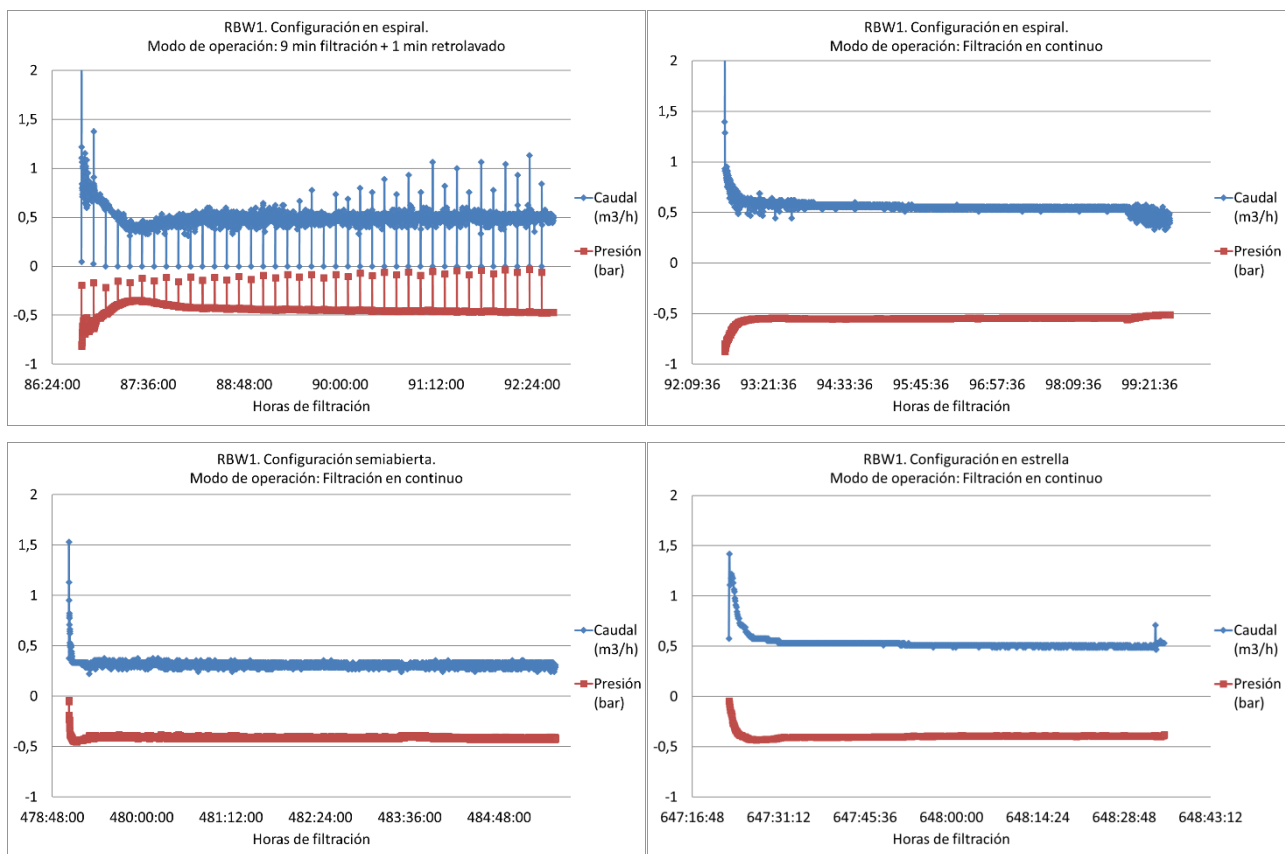


Figura 6. Evolución del comportamiento de la membrana para distintas configuraciones y modos de operación.

La Tabla 1 muestra la calidad del agua correspondiente al agua influente (el efluente del tratamiento secundario de la EDAR de Guadalajara) y al agua ultrafiltrada para todos los experimentos (incluyendo los 5 modelos de membranas tratados). Las membranas recicladas de UF son adecuadas para eliminar sólidos suspendidos (> 99.8%), turbidez (> 87.7%) y bacterias coliformes totales (> 99.996% o LRV). Los valores obtenidos alcanzarían los requisitos más estrictos del RD 1620/2007, sobre reutilización de aguas depuradas.

Tabla 1. Parámetros de calidad del agua del efluente secundario y del agua ultrafiltrada. Se indican los valores mínimo y máximo registrados durante toda la experimentación.

Parámetro	Influente	UF permeado	% Rechazo	RD 1620/2007
SST (mg/L)	1,0-156,0	0,0-4,0	99-100	5-35
Turbidez (NTU)	0,8-112,0	0,14-1,2	89-99	1-15
DQO (mg/L)	10,1-161,0	8,8-21,7	45-88	
Nt (mg/L)	9,9-11,5	10,2-12,1	3-5	10
Pt (mg/L)	0,3-1,6	0,3-1,5	9-17	2
<i>E.coli</i> UFC/100 mL	$3,3 \cdot 10^2 - 3,1 \cdot 10^5$	0,0-200	100	$0-10^4$
Otros coliformes (UFC/100mL)	$8,0 \cdot 10^3 - 6,0 \cdot 10^5$	0,0-400	99,996-100	

### 3.3 Membranas recicladas de NF para el tratamiento de agua salobre

Las membranas recicladas de NF se han instalado en dos tubos de presión (con una capacidad de 6 membranas cada tubo) habilitados para tal fin. En un tubo de presión se han instalado 6 membranas recicladas de agua de mar (RSWM) y en el otro tubo 6 membranas recicladas de agua salobre (RBWM), las cuales han estado operando durante más de un año manteniendo las mismas condiciones de operación que el resto de tubos de presión del bastidor. La Figura 7 muestra los coeficientes de permeabilidad y rechazo de sales obtenidos durante todo el periodo de experimentación de 3 casos: permeado de la primera etapa de la planta desaladora, permeado de las membranas recicladas de agua de mar (RSWM) y permeado de las membranas recicladas de agua salobre (RBWM).

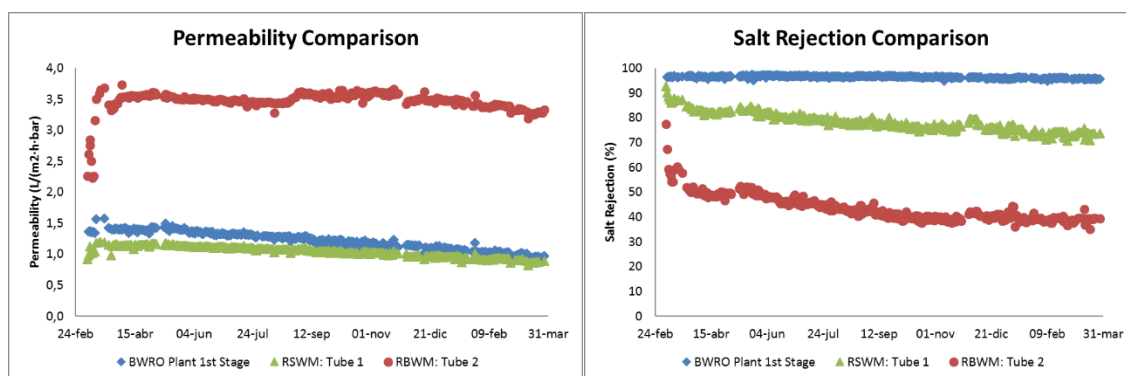


Figura 7. Comparación del comportamiento de las membranas: planta desaladora (1ª etapa) y membranas recicladas.

Tal y como era de esperar, las membranas recicladas presentan coeficientes de rechazo más bajos que las membranas de ósmosis inversa. Las membranas recicladas de agua de mar (RSW) se estabilizaron a las dos semanas de operación. La TMP requerida para alcanzar una conversión del 50% fue similar a la de las membranas de ósmosis inversa y la permeabilidad registrada fue ligeramente menor a éstas (Figura 7). Sin embargo, con el transcurso del tiempo la permeabilidad de las membranas RSW se ha igualado prácticamente a la de las membranas de ósmosis inversa de la primera etapa. Las membranas recicladas de agua salobre (RBW), por su parte, se estabilizaron después de casi un mes de filtración, requirieron una TMP significativamente menor que las membranas BWRO para alcanzar una recuperación del 50% y lograron una permeabilidad significativamente mayor que las membranas de RO (Figura 7).

El rechazo de sales, tanto de las membranas recicladas de agua de mar como de las membranas recicladas de agua salobre, ha ido disminuyendo a lo largo de la experimentación, debido principalmente al fenómeno de intrusión marina que está sufriendo el acuífero. Como puede observarse en la Figura 8, esto ha provocado un aumento de la concentración de iones  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  en el agua de alimentación que se ha traducido en un incremento de estos iones en el permeado, disminuyendo el rechazo de sales global de las membranas.



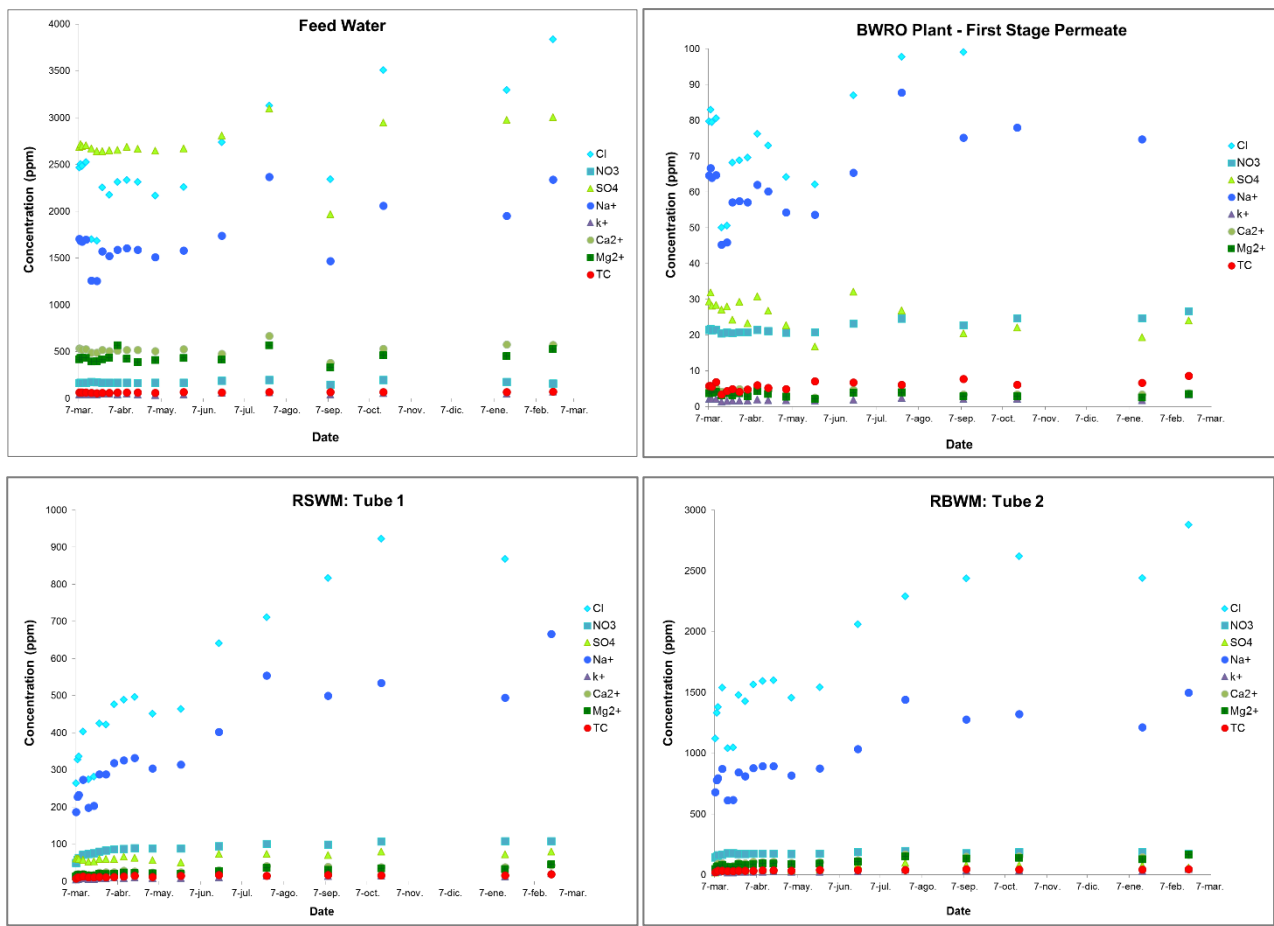


Figura 8. Comparación del comportamiento de las membranas: planta desaladora (1ª etapa) y membranas recicladas.

Sin embargo, el rechazo de los iones divalentes se ha mantenido prácticamente constante desde el comienzo de la experimentación. Tal y como puede observarse en la Tabla 2, los coeficientes de rechazo de iones sulfato, calcio y magnesio de las membranas RSW fueron similares a los obtenidos con membranas de BWRO (alrededor de 96% en el caso de membranas recicladas y 99% para membranas de OI), y un rechazo de monovalente ligeramente inferior a los de las membranas de BWRO (aproximadamente el 85% en las membranas recicladas y 97% para las membranas BWRO). Por su parte, las membranas RBW presentan un rechazo selectivo muy alto a iones sulfato (> 98%) y altos coeficientes de rechazo de calcio y magnesio (> 80%). Sin embargo, mostraron una capacidad de separación mucho menor de iones monovalentes (45% Cl<sup>-</sup>, 56% K<sup>+</sup>, 53% Na<sup>+</sup>) y coeficiente de rechazo TC (55%).

Tabla 2. Parámetros de calidad del agua del efluente secundario y del agua ultrafiltrada. Se indican los valores mínimo y máximo registrados durante toda la experimentación.

Membranas	Cl <sup>-</sup> (ppm)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ppm)	SO <sub>4</sub> <sup>+2</sup> (ppm)	Na <sup>+</sup> (ppm)	K <sup>+</sup> (ppm)	Ca <sup>+2</sup> (ppm)	Mg <sup>+2</sup> (ppm)	TC (ppm)
NF1	87,9	51,2	99,9	86,7	85,0	99,3	99,8	91,5
NF2	23,0	1,9	99,6	28,7	30,9	73,6	88,8	57,5
BWRO – 1st stage	97,9	91,2	99,4	97,4	97,4	99,4	99,5	94,1
RSWM	85,7	61,6	98,4	85,9	86,6	96,6	96,4	85,6
RBWM	44,8	2,1	98,8	52,7	55,5	85,4	84,8	55,3

### 3.4 Análisis de ciclo de vida (huella de carbono)

Los resultados del potencial de cambio climático están resumidos en la Figura 9. Las membranas de BW tienen un amplio beneficio ambiental. El bajo impacto del reciclaje favorece que la sustitución sea ambientalmente favorable. Hay que destacar las diferencias del impacto evitado de las membranas de SW. Esto se debe a que las bajas permeabilidades obtenidas reducen el ratio de compensación y la sustituibilidad de las membranas.

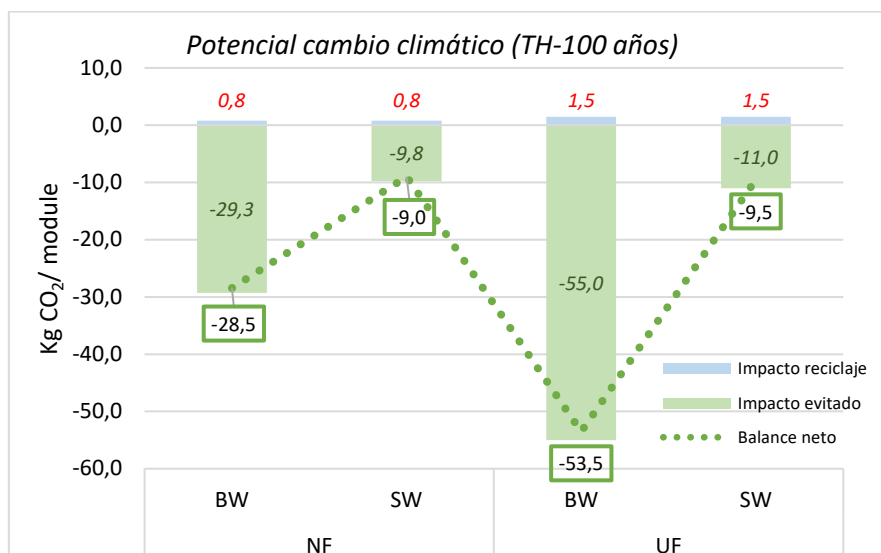


Figura 9. Potencial de cambio climático del reciclaje de por módulo reciclado de los diferentes membranas en función del tipo de agua para el que fue diseñado el módulo original (BW, SW) y el comportamiento final (NF y UF). En números rojos, el impacto del reciclaje; en verde, el impacto evitado y en negro y recuadro verde el balance neto.

## 4 CONCLUSIONES

La gestión de las membranas de ósmosis inversa al final de su vida útil es hoy en día una preocupación global ambiental y económica [6]. Los resultados obtenidos durante la validación de las membranas recicladas de NF y UF mostrados en el presente artículo muestran que el uso de membranas recicladas es técnicamente viable para las aplicaciones estudiadas. Generalmente las membranas recicladas son comparables a los rangos comerciales que ofrecen las membranas de nanofiltración y ultrafiltración. Sin embargo cuando se alcanzan coeficientes de rechazos similares a los modelos comerciales, la permeabilidad de las membranas recicladas es inferior. Además, en todos los casos se ha comprobado que las membranas recicladas de agua salobre permiten trabajar con permeabilidades mayores. Aunque en ambos casos se requiere evaluar el comportamiento de las membranas a largo plazo, estos resultados podrían potenciar el reciclaje de membranas desechadas para su utilización como membranas de UF en plantas desaladoras de agua de mar o en aquellas EDAR donde se reutilice el agua regenerada, haciendo una gestión sostenible dentro de la economía circular.

## 5 AGRADECIMIENTOS

Al instrumento financiero europeo LIFE que cofinancia el proyecto LIFE13 ENV/ES/000751 TRANSFOMEM ([www.life-transfomem.eu](http://www.life-transfomem.eu)). A los trabajadores de la desaladora de Cuevas del Almanzora, de la desaladora de Mutxamel-El Campello y a los de la EDAR de Guadalajara por su constante ayuda y apoyo.

## 6 REFERENCIAS

- [1] IDA, Yearbook 2015-2016, Water desalination report, 2016.
- [2] R. García-Pacheco, J. Landaburu-Aguirre, P. Terrero-Rodríguez, E. Campos-Pozuelo, F. Molina-Serrano, J. Rabadán, D. Zarzo-Martínez, E. García-Calvo. Validation of recycled membranes for treating brackish water at pilot scale, *Desalination*. 433 (2018) 199–208.
- [3] J. Landaburu-Aguirre, R. García-Pacheco, S. Molina, L. Rodríguez-Sáez, J. Rabadán, E. García-Calvo, Fouling prevention, preparing for re-use and membrane recycling. Towards circular economy in RO desalination, *Desalination*. 393 (2016) 16–30.
- [4] P. Terrero-Rodríguez, R. García-Pacheco, E. Campos-Pozuelo, F.J. Rabadán, S. Molina, A. Ortiz de Lejarazu, M. Calzada, D. Zarzo. Transformation of end-of-life RO membrane into recycled NF and UF membranes: Results of the transformation process (17WC-58237), in: *Proc IDAWC17, São Paulo, Brazil 15-20 Oct. 2017, n.d.*
- [5] E. Campos et al., Proceso de transformación de membranas de poliamida con enrollamiento en espiral que han agotado su vida útil en membrana de utilidad industrial, Spain Patent P201630931, July 08, 2016, (n.d.).
- [6] R. García-Pacheco, J. Landaburu-aguirre, P. Terrero-rodríguez, E. Campos, F. Molina-serrano, J. Rabadán, et al., Validation of recycled membranes for treating brackish water at pilot scale, *Desalination*. 433 (2018) 199–208. doi:10.1016/j.desal.2017.12.034.
- [7] S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller, eds., *Climate Change 2007: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge University Press, ISBN 978-0-521-88009-1 (pb: 978-0-521-70596-7).
- [8] European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability: International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General guide for Life Cycle Assessment - Detailed guidance. First edition March 2010. EUR 24708 EN. Luxembourg. Publications Office of the European Union; 2010
- [9] G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz, and B. Weidema, 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, [online] 21(9), pp.1218–1230. Available at: <<http://link.springer.com/10.1007/s11367-016-1087-8>> [Accessed 18 05 2018].