



# Zero Brine: recuperación de productos de valor añadido a partir de salmueras

La combinación de tecnologías avanzadas de filtración con etapas de precipitación dirigida permite valorizar las salmueras generadas en el ciclo integral del agua, tanto a nivel urbano como industrial. En este estudio, se ha optimizado una combinación de procesos para la recuperación de sales,  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{Mg(OH)}_2$ , y se ha analizado la viabilidad tecnoeconómica del tratamiento. Este estudio se ha replicado en un caso de estudio práctico enmarcado en el ciclo integral del agua urbana. Los resultados aquí expuestos demuestran la viabilidad del estudio para recuperar sales de calcio y magnesio con gran valor añadido, permitiendo la implementación de modelos circulares de gestión de residuos como las salmueras. Este estudio forma parte del proyecto Zero Brine para la valorización de las salmueras y que apuesta por la estrategia de vertido cero de líquidos (ZLD) y propone modelos circulares para la valorización de salmueras generadas en el ámbito industrial y urbano.

### Palabras clave

Potabilización, economía circular, recuperación productos, modelización, tratamiento de salmueras, vertido cero.

### ZERO BRINE PROJECT: RECOVERY OF VALUE-ADDED PRODUCTS FROM BRINES

*The combination of advanced filtration technologies with directed precipitation stages allows the recovery of brines generated in the integrated water cycle at both urban and industrial levels. In this study, different steps for the recovery of salts,  $\text{CaCO}_3$  and  $\text{Mg(OH)}_2$ , have been optimized and the techno-economic feasibility of this treatment has been analysed and here reported. This study has been replicated in a case study within brines generated in the integrated cycle of urban water. The results presented here demonstrate the feasibility of the study to recover value-added salts of calcium and magnesium, allowing the implementation of circular models in brine waste management. This study has been developed under the Zero Brine project, for the recovery of brines and which is committed to the strategy of zero liquid discharge (ZLD) and the proposal of circular models for brines generated in the industrial and urban spheres.*

### Keywords

*Drinking water, circular economy, product recovery, modelling, brine treatment, zero liquid discharge.*

#### Núria Zamorano López

técnica del Área de I+D+i de Sociedad de Fomento Agrícola Castellonense, S.A. (Facsca)

#### Elena Zuriaga

responsable técnico del Área de I+D+i de Sociedad de Fomento Agrícola Castellonense, S.A. (Facsca)

#### Xavier Martínez Lladó

director de la Unidad de Agua, Aire y Suelos de Eurecat

#### Sandra Meca

responsable de la Línea Residuos y Economía Circular de Eurecat

#### Caroline Sielfeld

investigadora de la Unidad de Agua, Aire y Suelos de Eurecat

#### Nikhil Dilip Pawar

técnico del Área de I+D+i de DLR

#### Rodrigo Duque

responsable del Departamento de Ingeniería y Proyectos de Sitra

#### Francisco Javier García Castillo

jefe del Departamento de Potabilización de Fomento Agrícola Castellonense, S.A. (Facsca)

#### Roelof Moll

responsable del Área de Estructuras Hidráulicas y Riesgo de Inundaciones de TU Delft



## 1. INTRODUCCIÓN

Siguiendo el principio de economía circular es necesario avanzar hacia un escenario en el que se cierre el ciclo del agua, a nivel urbano e industrial, mediante la reutilización de todos los recursos, incluyendo el agua, la energía y la recuperación de productos de valor añadido. Entre los sectores industriales con las mayores demandas de agua se encuentran el sector minero (13,2%), papelerero (12,2%), eléctrico (9,5%) y agroalimentario (4,2%). Por tanto, la industria tiene un rol destacado dentro de la búsqueda de medidas de mitigación contra la creciente demanda de agua y la cada vez mayor situación de déficit hídrico, pero es necesario el desarrollo de soluciones que permitan la recuperación de agua y otros productos de interés (energía, subproductos) a partir de estos procesos.

En muchas de estas industrias se genera un efluente con alta concentración en sales, o salmuera, que tiene asociado a su gestión como residuos una serie de problemas desde el punto de vista medioambiental (Katal *et al.*, 2020). Sin embargo, las salmueras son un recurso de gran valor ya que entre su composición salina se encuentran compuestos de interés como el magnesio o el calcio, que pueden ser recuperados y transformados en productos de valor añadido con tecnologías innovadoras.

En la gestión del ciclo integral del agua urbana cabe destacar la generación de grandes volúmenes de salmueras, especialmente en las zonas con mayor estrés hídrico y dependientes de las tecnologías de desalación, o aquellas áreas cuyos

acuíferos tienen un alto contenido en nitratos y requieren la aplicación de tecnologías de filtración para la generación de agua potable. En estas zonas, la implementación de desalación y desalobración mediante sistemas de filtración como la ósmosis inversa y otras tecnologías relacionadas ha permitido la producción de un agua potable de alta calidad.

Asociado a ello, cabe destacar el elevado volumen del residuo salino, conocido como salmuera, que se estima alcanzar los 141.5 Mm<sup>3</sup>/día a nivel mundial, según Jones *et al.* (2019). Al igual que la salmuera de origen industrial, los efluentes concentrados en sales generados en los procesos de potabilización de agua para uso urbano son una oportunidad para recuperar productos de valor añadido, siendo necesario el desarrollo de tecnologías que permitan convertir las salmueras en un recurso a valorizar.

Entre las tecnologías destacadas para la recuperación de productos de valor añadido a partir de salmueras, de origen industrial o urbano, se encuentran los procesos dirigidos por presión mediante la aplicación de membranas de microfiltración, ultrafiltración, nanofiltración, ósmosis inversa y ósmosis directa, considerando tanto membranas de primer uso como regeneradas para un segundo fin. Además, tecnologías de separación con procesos por membrana térmicos como la destilación o los contactores de membrana; o la electrodiálisis pueden ser de gran utilidad para recuperar recursos a partir de salmueras (Cipolleta *et al.*, 2021). Entre todos, cabe destacar la apli-

cación de la cristalización eutéctica en frío, y otros tipos de procesos de electrodiálisis como la metátesis, las membranas bipolares y la electrodiálisis reversa. El estudio del potencial de estas tecnologías para su aplicación en procesos circulares de tratamiento de salmueras ha sido uno de los principales objetivos del proyecto Zero Brine ([www.zerobrane.eu](http://www.zerobrane.eu)) en el que han colaborado las entidades Eurecat, DLR, Facsa y Sitra, entre otras, coordinadas por TU Delft.

En el proyecto se ha demostrado la viabilidad técnica y económica de la combinación de procesos de nanofiltración con membranas junto con técnicas de evaporación y cristalización, para la recuperación de sales de sulfato de calcio y magnesio. La solución evaluada se ha replicado en un caso urbano, a partir de salmueras generadas en procesos de potabilización del agua. A partir de este residuo, convertido en recurso, se ha visto la viabilidad del tratamiento para recuperar sales que permiten reducir la demanda de estos recursos en otros procesos, favoreciendo la circularidad de los tratamientos de agua y sus efluentes salinos.

El estudio de la viabilidad económica de la aplicación de este proceso a la gestión de las salmueras y la recuperación de productos de valor añadido se ha llevado a cabo mediante el desarrollo un *software* que permite modelizar la cadena de tratamientos más adecuados para cada salmuera, logrando replicar el estudio en otros ámbitos tanto del ciclo urbano como industrial del agua y favorecer la sostenibilidad de los procesos asociados a la gestión de las salmueras.

» Zero Brine demuestra la viabilidad técnica y económica de la combinación de procesos de nanofiltración con membranas, junto con técnicas de evaporación y cristalización, para la recuperación de sales de sulfato de calcio y magnesio

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

### 2.1. ANÁLISIS DE CALIDAD DE LAS SALMUERAS

En total se han analizado 35 plantas en las que se generan salmueras a partir del tratamiento de aguas del ciclo integral urbano y 4 del industrial. En ellas se han analizado los parámetros fisicoquímicos: pH, conductividad, sólidos totales y contenido en volátiles, sales disueltas; y compuestos iónicos como  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$ . Para las salmueras elegidas, tras una primera evaluación se realizó un análisis detallado para conocer el contenido en elementos con elevado potencial y valor añadido tales como: bicarbonatos, sulfuros totales, aluminio, antimonio, arsénico, azufre, bario, berilio, boro, cadmio, cromo, cobalto, cobre, estaño, estroncio, hierro, litio, manganeso, molibdeno, níquel, plata, plomo, selenio, silicio, talio, titanio, vanadio y zinc. Para la elección de la salmuera a utilizar en los ensayos en *batch* se eligió aquella con mayor contenido en sales bivalentes de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ .

### 2.2. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE RECUPERACIÓN DE PRODUCTOS DE VALOR AÑADIDO

A través del modelo integrado en el *software* OLI (OLI Studio v.10.0.2.1 copyright 1997-2020 OLI Systems, Inc.) y los datos recopilados sobre la calidad de la salmuera elegida para los ensayos de laboratorio, se calculó la cantidad de reactivo ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) necesario para favorecer la precipitación del calcio y otros iones bivalentes contenidos en la salmuera. Los ensayos de precipitación se llevaron a cabo a escala laboratorio mediante la adición de 0,5 L de salmuera y reactivo en condiciones de agitación

FIGURA 1. Sistema de filtración por membranas a escala laboratorio.

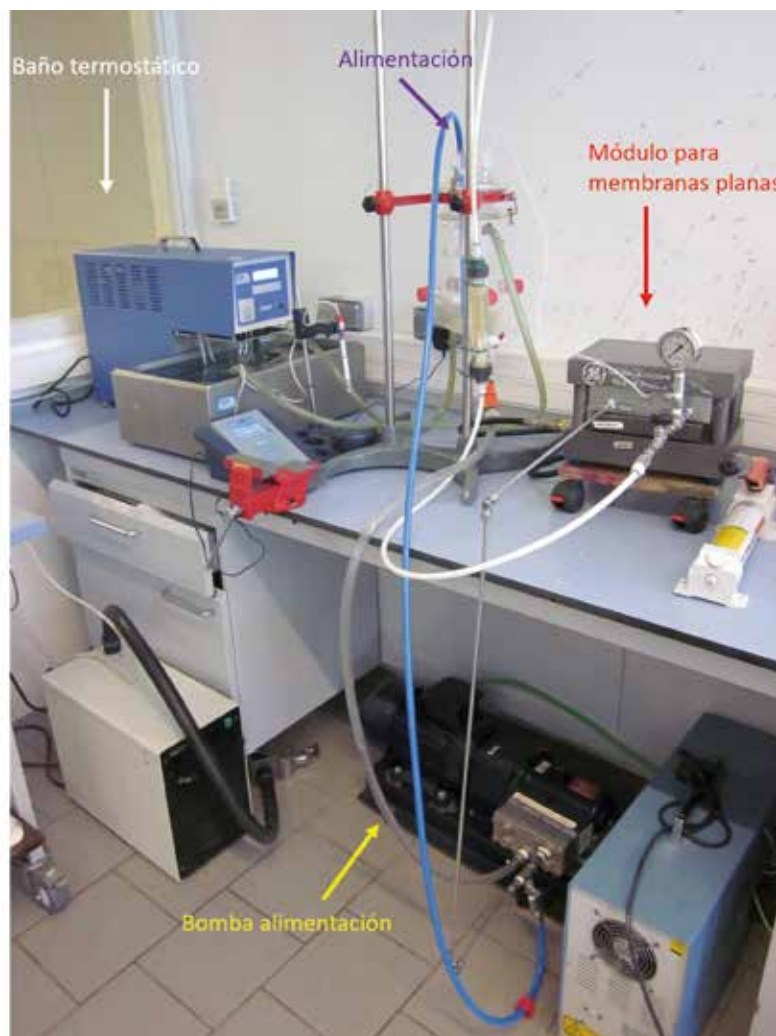


FIGURA 2. Módulo para filtración por membranas planas a escala laboratorio.



constante. Los ensayos tuvieron una duración de 3 h y se tomaron muestras en intervalos de 15 minutos. Las muestras se analizaron a nivel fisicoquímico tras ser filtradas por  $0,2 \mu\text{m}$ , con el fin de simular un último paso de ultrafiltración en la cadena de tratamiento.

La muestra resultante de la etapa de precipitación de Ca se trató mediante nanofiltración en un equipo a escala laboratorio (Figuras 1 y 2) para concentrar el efluente previo a la etapa de recuperación de magnesio. Se utilizó una membrana plana NF270 (FilmTec), y la filtración fue



realizada en *batch* a una presión de 15 bar y hasta una recuperación del 75%.

A través de la herramienta Software PhreeqC (Versión 3.7.1. United States Geological Survey -USGS- 2021) se evaluó la cantidad de reactivo (NaOH) necesaria para precipitar magnesio. Los ensayos de precipitación se realizaron añadiendo el reactivo a 0,25 L de muestra (concentrado del paso previo de nanofiltración), tuvieron una dura-

ción de 0,5 h y se tomaron muestras cada 15 minutos. Todos los ensayos fueron realizados a temperatura ambiente ( $22\pm 1^\circ\text{C}$ ).

### 2.3. PLATAFORMA DE MODELIZACIÓN

La cadena de tratamiento se simuló a través de la plataforma RCE (*Remote Component Environment*) por parte del centro tecnológico DLR. Es un *software* en abierto que permite un control a partir de la combina-

ción de distintos procesos como la nanofiltración o la precipitación de calcio. Como resultado, la plataforma proporciona:

- Resultados de la estimación del proceso de recuperación de sales.
- Análisis económico del coste de la cadena de tratamiento.

### 2.4. ANÁLISIS TECNOECONÓMICO

El modelado tecnoeconómico de la nanofiltración (NF) y los precipitadores se discute en los trabajos previos de este proyecto (Micari *et al.*, 2019-1; Micari *et al.*, 2020). En el análisis económico los costes de mantenimiento anuales se expresaron mediante el parámetro de coste nivelado asociado a la gestión de la salmuera (*levelized brine cost*, LBC) en USD/tonNaCl (Micari *et al.*, 2019-2). Este parámetro se calcula como se indica en la **Ecuación 1**. Los conceptos de CAPEX y OPEX se calcularon asumiendo una tasa de interés del 6% y periodos de depreciación específicos de la tecnología. Además, se han tenido en cuenta los beneficios potenciales de la recuperación de  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ .

**ECUACIÓN 1.** Cálculo del coste asociado a la salmuera (LBC).

$$LBC \left[ \frac{\text{USD}}{\text{m}^3 \text{ salmuera}} \right] = \frac{\text{CAPEX} + \text{OPEX} - \text{Retorno}_{\text{CaCO}_3 + \text{Mg}(\text{OH})_2} \left[ \frac{\text{USD}}{\text{año}} \right]}{\text{permeado o salmuera} \left[ \frac{\text{m}^3 \text{ salmuera}}{\text{año}} \right]}$$

Parámetros	Unidades	Valor
pH	pH	8,1
Conductividad	$\mu\text{S}/\text{cm}$	101.812
Sólidos totales	mg/L	14%
Sólidos volátiles	mg/L	48%
Sales disueltas	mg/L	4.585
$\text{NO}_3^-$	mg/L	0,8
$\text{NO}_2^-$	mg/L	0,11
$\text{Cl}^-$	mg/L	40.020
$\text{SO}_4^{-2}$	mg/L	2.901
$\text{Ca}^{2+}$	mg/L	344
$\text{Mg}^{2+}$	mg/L	452
$\text{Na}^+$	mg/L	24.720
$\text{K}^+$	mg/L	335
Dureza total	mg/L	2.720
Bicarbonatos	mg/L	386
Carbonatos	mg/L	< 20
$\text{Al}^{+3}$	$\mu\text{g}/\text{L}$	< 100
Sulfuros	mg/L	991
Boro	$\mu\text{g}/\text{L}$	2.153
Estroncio	$\mu\text{g}/\text{L}$	11
Hierro	$\mu\text{g}/\text{L}$	29

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. LÍNEA DE TRATAMIENTO PARA LA RECUPERACIÓN DE SALES

Las características físicoquímicas de la salmuera elegida para el estudio de replicabilidad se muestran en **Tabla 1**. El criterio de selección se basó en el mayor contenido en los cationes bivalentes de interés para la producción a futuro de sales como el Ca o el Mg para la regeneración de  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , respectivamente. Las salmueras de origen industrial fueron descartadas por la necesidad de aplicar pasos de pretratamiento para la reducción de la carga orgá-



nica, ya que presentaban un riesgo para la tecnología propuesta que combina etapas de filtración en distintas condiciones de pH y que se muestra en la **Figura 3**. Tras el análisis extendido del contenido en metales de las otras salmueras de origen inorgánico empleadas en el estudio, se descartó que hubiera riesgo e impacto negativo de interacción entre el contenido en estos y el proceso de recuperación de sales.

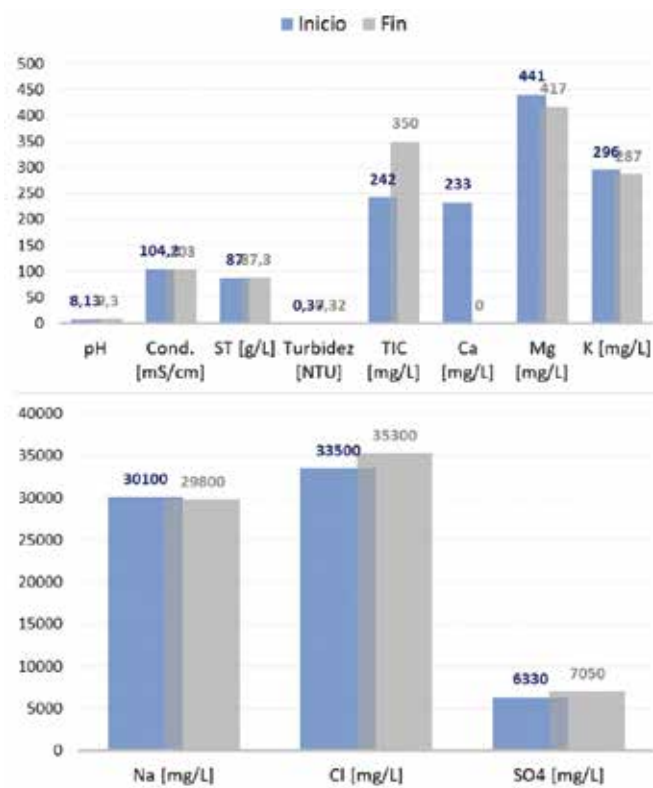
La salmuera elegida presenta un alto potencial de recuperación de Mg y Ca (452 mg/L y 344 mg/L, respectivamente). En el primer paso del tratamiento se provoca la precipitación de Ca como  $\text{CaCO}_3$  mediante la adición de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ . A continuación, se añade una etapa de nanofiltración mediante membranas de nanofiltración que permite recuperar Mg y  $\text{SO}_4^{2-}$  en una siguiente etapa y, a su vez, purificar la salmuera en un permeado que puede ser reutilizado. El último paso consiste en la precipitación de Mg en forma de  $\text{Mg(OH)}_2$  mediante la adición de NaOH. En este punto, el proceso de recuperación de productos de valor añadido a partir de una salmuera inorgánica de origen urbano, como la analizada, podría considerarse completado. No obstante, sería posible añadir una etapa adicional de evaporación para la recuperación de  $\text{SO}_4^{2-}$  en forma de  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ . Sin embargo, esta última etapa no se evaluó a nivel experimental en este estudio.

Según los resultados obtenidos introduciendo las características iniciales de la salmuera al *software* OLI, se realizaron ensayos de precipitación de Ca a escala laboratorio con distintas concentraciones de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  (0,5 y 0,8 g  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ /L salmuera). Se observó que es necesario añadir 0,8g/L de  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  y ajustar el pH a

**FIGURA 3.** Esquema de tratamiento de recuperación de sales propuesto.



**FIGURA 4.** Precipitación de Ca mediante  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ .



9,5 (ratio de 0,42 g NaOH/L de salmuera) para favorecer e incrementar la precipitación de Ca, obteniendo una reducción de la concentración de Ca en la salmuera por debajo de los límites detectables, lo que indica una eficiencia de recuperación cercana al 99%. El cambio en el resto de los compuestos y elementos detectados en la salmuera se muestra en la **Figura 4**. En el paso de nanofiltración se obtuvieron unas eficiencias de rechazo de Mg del 63,5% y

de  $\text{SO}_4^{2-}$  del 98,9%, tal y como se recoge en la **Tabla 2**.

Según los resultados obtenidos introduciendo las características del concentrado obtenido en la etapa de nanofiltración al *software* PhreeqC, se realizaron una serie de ensayos de precipitación de Mg a escala laboratorio con distintas concentraciones de NaOH (2, 4 y 6 g NaOH/L salmuera). Se observó que es necesaria la adición de 6 g/L de NaOH para favorecer e incrementar la pre-



TABLA 2

**PORCENTAJE DE RECHAZO DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES DE LA SALMUERA.**

Parámetro	Rechazo
Mg (%)	63,5
Cl (%)	0,8
SO <sub>4</sub> (%)	98,9
K (%)	11,5

cipitación de Mg, mostrándose en el proceso una reducción de la concentración en el efluente de 1.070 mg/L hasta valores inferiores al límite de detección (<50 mg/L), lo que indica una eficiencia cercana al 95%. No obstante, sería necesario corroborar este proceso considerando que el magnesio precipita en forma de magnesita y no solo de brucita, para validar los resultados.

### 3.2. ANÁLISIS DE RESULTADOS SOBRE LA VIABILIDAD TECNOECONÓMICA

Los valores correspondientes a la fase experimental fueron ajustados para cumplir el principio de electroneutralidad. En la fase de nanofiltración y según el modelo RCE

desarrollado se observaron valores de rechazo de 54,3% para el Mg, 97,9% para el SO<sub>4</sub> y 0% para el Cl. Estos valores difieren ligeramente de la fase experimental que fueron más elevados, 63,5% para el Mg, mientras que el modelo se ajusta de mejor manera a la recuperación de Cl (0,8%) y SO<sub>4</sub> (98,9%).

Por tanto, los resultados demuestran que la plataforma desarrollada permite de manera efectiva estimar los resultados técnicos de este proceso (Tabla 3). No obstante, los resultados del estudio de viabilidad económica no consideraron los costes asociados al ajuste de pH, ultrafiltración y evapotranspiración para la precipitación del Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>. Por tanto, las consideraciones económicas para determinar el parámetro LBC (USD/tonNaCl) no reflejan los costes de estos aspectos ni la recuperación del Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

El paso de evaporación (último paso del tren de tratamiento, ver Figura 3) no pudo ser modelado por la plataforma RCE. Por lo tanto, no se realizaron experimentos a escala de laboratorio para determinar los parámetros operativos del proceso. Sin

embargo, se puede hacer un cálculo simple para estimar la recuperación de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> por evaporación, ya que la cantidad de sulfato determina la cantidad de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> que se puede recuperar. La cantidad de sulfato contenida en la salmuera después de la precipitación del Mg es de 25.800 mg/L, lo que corresponde a 0,27 mol/L. Por lo tanto, se podría recuperar un máximo de 0,27 mol/L de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> de la salmuera. Esto corresponde a 38,2 g/L de Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>.

Según el estado de las tecnologías de desalación en España, dependiendo de la tecnología seleccionada el coste de explotación para la generación de agua potable a partir de afluentes con alta concentración salina oscila entre 0,111-0,134 €/m<sup>3</sup>. El precio más bajo está relacionado con las plantas de nanofiltración (0,111 €/m<sup>3</sup>), seguido de la ósmosis inversa (0,129 €/m<sup>3</sup>) y, finalmente, la electrodiálisis (0,129 €/m<sup>3</sup>). Teniendo en cuenta estos valores, se observa que un tratamiento posterior de la salmuera para recuperar productos de interés requeriría un buen equilibrio entre los ingresos y los costes relacionados con la tecnología.

TABLA 3

**COMPARATIVA ENTRE LOS RESULTADOS DE LABORATORIO Y DEL SISTEMA DE MODELIZACIÓN.**

Parámetros	Parámetros	Salmuera inicial	Postprecipitación de Ca	Permeado NF	Permeado NF	Postprecipitación de Mg
Modelo RCE	Na [mg/L]	23.057	23.181	21.178	33.046	29.926
	Cl [mg/L]	31.608	31.430	32.750	32.726	26.962
	Ca [mg/L]	222	3,8 <sup>E-14</sup>	8,5 <sup>E-15</sup>	1,5 <sup>E-13</sup>	1,2 <sup>E-13</sup>
	Mg [mg/L]	416	414	189	1.346	1,5 <sup>E-13</sup>
	SO <sub>4</sub> [mg/L]	6.045	6.011	124	27.253	22.728
Ensayos de batch experimentales	Na [mg/L]	30.100	29.800	26.600	38.100	40.600
	Cl [mg/L]	33.500	35.300	350.00	37.400	36.600
	Ca [mg/L]	233	< 50	< 50	< 50	< 100
	Mg [mg/L]	441	417	152	1.070	< 50
	SO <sub>4</sub> [mg/L]	6.330	7.050	< 80	25.800	25.800

TABLA 4				
ANÁLISIS DE COSTES DEL TRATAMIENTO DE SALMUERAS PROPUESTO.				
Input/Output del modelo	Parámetro	Unidades	Global (USD)	Global (euros)
capex cryst_NaCarbo_CaCarbo	CAPEX Crystallization 1	\$/año	\$ 15.432,49	€ 13.117,62
opex cryst_NaCarbo_CaCarbo	OPEX Crystallization 1	\$/año	\$ 2.136,16	€ 1.815,74
revenue CaCO <sub>3</sub>	Revenue CaCO <sub>3</sub>	\$/año	\$ 2.096,12	€ 1.781,70
capex NF1	CAPEX Nanofiltration	\$/año	\$254.983,39	€ 216.735,88
opex NF1	OPEX Nanofiltration	\$/año	\$149.761,40	€ 127.297,19
capex cryst_NaOH_MgHydro	CAPEX Crystallization 2	\$/año	\$ 20.546,30	€ 17.464,35
opex cryst_NaOH_MgHydro	OPEX Crystallization 2	\$/año	\$ 5.062,39	€ 4.303,03
revenue Mg(OH) <sub>2</sub>	Revenue Mg(OH) <sub>2</sub>	\$/año	\$ 10.666,02	€ 9.066,11
CAPEX	Global CAPEX	\$/m <sup>3</sup>	\$ 30,53	€ 25,95
OPEX	Global OPEX	\$/m <sup>3</sup>	\$ 15,13	€ 12,86
LBC Total	Total LBC	\$/m <sup>3</sup>	\$ 45,65	€ 38,81

Acorde a los resultados obtenidos en este estudio, los costes de CAPEX y OPEX relacionados con el tratamiento para la valorización de la salmuera son de 25,95 €/m<sup>3</sup> y 12,86 €/m<sup>3</sup>, respectivamente (**Tabla 4**).

En referencia a los costes de posible comercialización de los productos recuperados a partir de la salmuera con el tratamiento propuesto (CaCO<sub>3</sub> y Mg(OH)<sub>2</sub>), se sitúa en un LBC de 38,81 €/m<sup>3</sup>. Esta estimación englobaría ambos compuestos, considerando una alta calidad y riqueza de estos que permitan su venta a mercado. No obstante, es necesario seguir desarrollando validaciones a escala de laboratorio y optimizando los procesos de recuperación mediante el software RCE de modelación para poder garantizar la viabilidad de la recuperación de estos.

#### 4. CONCLUSIONES

La combinación de tecnologías avanzadas de filtración con etapas de precipitación dirigida permite valorizar un residuo generado en

el ciclo integral del agua, urbano e industrial, como es la salmuera. El desarrollo de una estrategia de tratamiento que cuenta con varias etapas de precipitación y filtración permitiría valorizar la salmuera hasta 38,81 €/m<sup>3</sup> mediante la recuperación de sales de calcio y de magnesio (CaCO<sub>3</sub> y Mg(OH)<sub>2</sub>). Este proceso se ha desarrollado a partir de salmueras generadas en el ciclo del agua industrial. Su viabilidad se ha estudiado y demostrado en este estudio para salmueras generadas en el ciclo urbano del agua. Por tanto, este estudio potencia la transformación de los procesos actuales de gestión de residuos y salmueras hacia sistemas más sostenibles y de recuperación de recursos más circulares, siguiendo los principios de vertido cero o ZLD.

#### 5. AGRADECIMIENTOS

El proyecto está financiado por el programa Horizon 2020 de la Unión Europea bajo el acuerdo número 7303390.

#### Bibliografía

- [1] Cipolletta, G.; Lancioni, N.; Akyol, Ç.; Eusebi, A. L.; Fatone, F. (2021). Brine treatment technologies towards minimum/zero liquid discharge and resource recovery: State of the art and techno-economic assessment. *Journal of Environmental Management*, núm. 300. doi:10.1016/j.jenvman.2021.113681.
- [2] Jones, E.; Qadir, M.; van Vliet, M.T.H.; Smakhtin, V.; Kang, S. (2019). The state of desalination and brine production: A global outlook. *Science of The Total Environment*, núm. 657, págs. 1.343-1.356. doi:10.1016/j.scitotenv.2018.12.076.
- [3] Katal, R.; Ying Shen, T.; Jafari, I.; Masudypanah, S.; Hossein Davood Abadi Farahani, M. (2020). An overview on the treatment and management of the desalination brine solution. *Desalination - Challenges and Opportunities*. doi:10.5772/intechopen.92661
- [4] Micari, M.; Cipollina, A.; Tamburini, A.; Moser, M.; Bertsch, V.; Micale, G. (2019). Combined membrane and thermal desalination processes for the treatment of ion exchange resins spent brine. *Applied Energy*, núm. 254. doi:10.1016/j.apenergy.2019.113699.
- [5] Micari, M.; Moser, M.; Cipollina, A.; Fuchs, B.; Ortega-Delgado, B.; Tamburini, A.; Micale, G. (2019). Techno-economic assessment of multi-effect distillation process for the treatment and recycling of ion exchange resin spent brines. *Desalination*, núm. 456, págs. 38-52. doi:10.1016/j.desal.2019.01.011.
- [6] Micari, M.; Cipollina, A.; Tamburini, A.; Moser, M.; Bertsch, V.; Micale, G. (2020). Techno-economic analysis of integrated processes for the treatment and valorisation of neutral coal mine effluents. *Journal of Cleaner Production*, núm. 270. doi:10.1016/j.jclepro.2020.122472.