

Estudios sobre la Economía Española - 2020/22

La Desalación del Agua en España

Domingo Zarzo Martínez
(AEDyR)

Agosto 2020

fedea

Las opiniones recogidas en este documento son las de sus autores y no coinciden necesariamente con las de FEDEA.

La Desalación del Agua en España

Domingo Zarzo Martínez

Presidente de la Asociación Española de Desalación y Reutilización (AEDyR)

Calle Diego de León, 47, 28006 Madrid.

Tel: 918388517

Email: dzarzo@sacyr.com

Resumen

España es uno de los países con mayor capacidad instalada de desalación a nivel mundial y cuenta con un sólido sector conformado por diseñadores, constructores, operadores, empresas públicas, administraciones y centros de investigación. La capacidad de desalación instalada (aproximadamente 5 millones de m³/día), podría potencialmente suministrar agua para una población de 34 millones de habitantes.

En este artículo se describirá la historia de la desalación en España, así como la situación actual y sus perspectivas futuras, incidiendo en los costes de implantación y operación, así como en los motivos de la fuerte implantación del uso del agua desalada para agricultura.

Palabras Clave: desalación, costes de la desalación, salmueras, ósmosis inversa

Clasificación JEL: Q25, L95, O13

Abstract

Spain is one of the countries with the highest installed desalination capacity worldwide and features a strong sector made up of designers, builders, operators, public companies, authorities and research centers.

In this paper the history of desalination in Spain will be described, as well as the current situation and its future prospects, focusing on the costs of implementation and operation, as well as the reasons for the strong implementation of the use of desalinated water for agriculture.

Keywords. Desalination, desalination costs, brines, reverse osmosis

JEL Classification: Q25, L95, O13

1. Introducción

Los recursos hídricos generalmente conocidos como no convencionales, como la desalación y la reutilización, se han convertido en un complemento imprescindible de la planificación hidrológica y en mayor medida en aquellos países que, como España, sufren importantes sequías periódicas y un déficit estructural de agua en determinadas regiones. Esta situación es y será agravada asimismo por los efectos del cambio climático, por lo que es previsible un crecimiento importante de estas tecnologías en los próximos años.

De acuerdo con datos recientes de la International Desalination Association (IDA,2019), existen en el mundo aproximadamente 18.000 desaladoras que producen más de 100 millones de metros cúbicos al día de agua desalada. Aproximadamente un 60% proviene de aguas marinas, siendo el resto procedente de aguas salobres de distinto origen (ríos, lagos, aguas subterráneas, agua residual, etc.).

La tecnología de desalación predominante en la actualidad es la ósmosis inversa (abreviadamente RO, del inglés *reverse osmosis*), por medio de membranas semipermeables sometidas a presión. Las tecnologías basadas en la evaporación y posterior condensación del agua están desde hace años en franco retroceso incluso en los países del Golfo Pérsico, donde han sido aplicadas tradicionalmente, por su mayor consumo energético.

Los países con mayor capacidad de producción mundial de agua desalada son los del Golfo Pérsico, con Arabia Saudí a la cabeza, seguidos de Estados Unidos y España, que representa la quinta posición en capacidad desalada a nivel mundial y primera de Europa. Asimismo, las empresas y la industria española representan una fuerte potencia en el mercado de la desalación y del agua en general, con 6 empresas españolas en la clasificación de las 20 mayores empresas desaladoras del mundo (IDA, 2019).

2. Aspectos generales de la desalación

2.1. Aspectos técnicos

Como se ha comentado anteriormente la tecnología de desalación más utilizada en la actualidad es la ósmosis inversa. Esta tecnología se basa en aplicar presión (por medio de una bomba) sobre las membranas para producir un agua libre de sales (agua desalada o producto) y un rechazo (concentrado o salmuera) donde se concentran las sales extraídas del sistema. Las plantas desaladoras cuentan además con sistemas de captación de agua, pretratamientos (físicos y químicos)

para proteger a las membranas, así como un post-tratamiento para adecuar el agua desalada al uso al que vaya destinada.

Para obtener la presión necesaria para el sistema es necesario aportar a las bombas de alta presión (y a los demás sistemas) energía eléctrica. El consumo energético de estas instalaciones se encuentra en la actualidad en el entorno de 3 Kw-h por cada m³ de agua producida (en general inferior a 4 en las nuevas instalaciones incluyendo los sistemas auxiliares y otros bombeos) y ha ido reduciéndose desde valores superiores a 20 Kw-h/m³ en los años 60 del pasado siglo hasta los valores actuales (Zarzo y Prats, 2018), gracias a las mejoras en la química y configuración de las membranas y en los sistemas de recuperación de energía residual de la salmuera.

El consumo de energía es el mayor coste de producción de agua desalada, por lo que su reducción es el factor clave para la reducción del precio del agua desalada. Lamentablemente no es posible producir agua desalada procedente del mar con un consumo inferior a 1 Kw-h/m³ debido a motivos termodinámicos (el trabajo necesario para desalar agua es igual al trabajo necesario para disolver las sales en agua, y este es el valor calculado de forma aproximada para la salinidad del agua de mar).

En los últimos tiempos se ha investigado la posibilidad de reducir este consumo mediante la implantación de las llamadas tecnologías emergentes (forward osmosis, pervaporación, destilación de membrana, membranas de grafeno, etc.) pero éstos intentos han fracasado debido a la barrera termodinámica del límite de consumo mínimo, y si bien estas tecnologías no se han podido implantar a gran escala ni es esperable que puedan sustituir a la ósmosis inversa, si se les ha encontrado aplicaciones interesantes, como es el uso de sistemas híbridos, la producción de energía por la mezcla de corrientes de alta salinidad con aguas dulces o tratamientos para las salmueras.

2.2. Aspectos ambientales y sanitarios

Las sales extraídas de los sistemas de desalación, conocidas como rechazos o salmueras, deben ser devueltas al mar tras el proceso de desalación. En general, hay una cierta preocupación acerca de la potencial toxicidad o impacto negativo de las salmueras sobre el medio marino y recurrentemente se producen publicaciones en los medios de comunicación de masas alertando de estos riesgos, fomentados por los detractores de la desalación. En realidad, antes del diseño y construcción de las desaladoras se realizan rigurosos estudios de impacto ambiental y modelización matemática de los vertidos y su mezcla con el agua de mar, cuyos resultados son aplicados a la

construcción de plantas por medio de la instalación de sistemas de mezclado previo con agua de mar y vertido por medio de difusores, que garantizan la mezcla rápida de la salmuera con el agua marina eliminando el riesgo para las especies marinas más sensibles y para el medio marino en general. Del mismo modo, durante la fase de operación de las instalaciones se implementan planes de vigilancia y monitorización ambientales continua para descartar los impactos y, en caso de producirse, adoptar las medidas correctoras necesarias.

En este sentido, es interesante ver cómo han ido cambiando los criterios de control de vertidos (que se han plasmado en las declaraciones de impacto ambiental) por parte de las administraciones españolas con el tiempo y la experiencia, lo cual queda reflejado en el reciente artículo de Sola *et al.* (2019), donde se puede observar la gran disparidad de criterios aplicados y a menudo incluyendo requerimientos y controles sin demasiado sentido o criterio científico.

Uno de los problemas más importantes de las salmueras se presenta realmente en las plantas de interior, donde es complicado gestionar los vertidos y donde no hay una solución técnica y económicamente viable para todos los casos. El vertido líquido cero, por medio de la evaporación-cristalización, es inviable económicamente en muchos casos y soluciones como la inyección en acuíferos profundos (que se usa por ejemplo en antiguos pozos de petróleo en Texas), vertido a cauces naturales o redes de alcantarillado tienen en general un gran impacto negativo, dejando quizá como la solución potencial más prometedora la producción de sales y productos químicos a partir de las salmueras (Zarzo, 2018).

Respecto a los aspectos sanitarios de la desalación, es decir, como afecta el uso de agua desalada para abastecimiento humano, indicar que el agua desalada es un agua de excelente calidad, libre de todo tipo de contaminantes, incluida la contaminación microbiológica, siendo en muchos casos únicamente necesaria su remineralización (es decir, añadir sales, como Calcio y Magnesio), para adecuar su calidad a la requerida por la legislación de aguas potables (el RD140/2003 en el caso de España). Estos aspectos están muy estudiados y han sido contemplados por la Organización Mundial de la Salud en su informe “Desalination for safe wáter supply. Guidance for the Health and Environmental Aspects Applicable to Desalination” (WHO/SDE/WSH, 2017). En el caso concreto de la aplicación del agua desalada para agricultura, también la FAO publicó sus recomendaciones para este uso (FAO, 2004).

2.3. Aspectos económicos

Los costes de la desalación se componen de múltiples factores que podemos clasificar en dos grupos;

- 1) costes de inversión, relacionados con la implantación de la instalación y que incluyen proyectos, autorizaciones y licencias, costes de diseño, construcción y puesta en marcha, costes financieros, seguros, garantías, etc.
- 2) costes de producción de agua desalada, que incluyen los costes financieros y de amortización de las instalaciones, los costes de personal, productos químicos, consumibles, reposición de membranas, mantenimiento de las instalaciones, tratamiento de efluentes y residuos, costes ambientales, etc.

Respecto a los costes de inversión de las desaladoras, estos han variado mucho con el tiempo y tienen una fuerte dependencia de los costes locales de personal, obras civiles o costes financieros. En la tabla 1 se puede ver una relación de costes de inversión de proyectos de grandes desaladoras de agua de mar por ósmosis inversa en distintos países y años y con distintas fórmulas contractuales.

Tabla 1. Costes de inversión y operación de distintas desaladoras de agua de mar por ósmosis inversa

Planta	País	Año construcción	Capacidad (m ³ /día)	Inversión (millones €)	Ratio (€/m ³ /día instalado)	Tarifa producción (€/m ³)	Tipo de contrato
Larnaca	Chipre	2001	52.000	47	904	0,64	EPC
Ashkelon	Israel	2005	396.000	182	460	0,45	BOT
Singspring	Singapur	2005	136.380	100	733	0,42	BOO
Honaine	Argelia	2005	200.000	194	970	0,65	BOT
Perth	Australia	2006	143.000	333	2329	1,01	BOD
Aguilas	España	2008	210.000	290	1381	0,50	EPC+O&M
Skikda	Argelia	2009	100,00	95	950	0,64	DBO
Beni Saf	Argelia	2010	200.000	132	660	0,60	DBO
Chennai	India	2010	100.000	78	780	0,89	BOT
Limassol	Chipre	2012	40.000	47	1175	0,75	BOT
SSDP (Perth II)	Australia	2012	306.000	517	1690	0,35	Alliance
Qingdao	China	2013	100.000	116	1160	0,61	EPC+O&M
Tuaspring	Singapur	2013	318.500	546	1714	0,31	BOOT
Ashdod	Israel	2014	384.000	320	833	0,46	EPC
Torre Vieja	España	2014	240.000	341	1420		EPC+O&M
Tenes	Argelia	2015	200.000	199	995	0,51	DBO
Tuas III	Singapur	2018	136.000	187	1375	0,46	DBOO
Shuqaiq 3	Arabia Saudí	2021	450.000	516	1147	0,45	BOT
Rabigh	Arabia Saudí	2022	600.000	559	932	0,47	DBO
Taweelah	EAU	2022	900.000	473-1.032	526-1147	0,42	BOT

Fuente: tabla ampliada y adaptada de (Cosin, 2019). Valores en dólares transformados a euros al cambio actual (julio 2020)

Aunque es muy difícil generalizar acerca de los costes de inversión de la desalación ya que cada planta puede ser muy diferente a las demás (por tener distintos sistemas de captación, pretratamiento, tipología de obra civil, depósitos, distancia al mar, bombeos, etc.) y los costes son muy variables dependiendo del país, de esta tabla podemos extraer algunas conclusiones interesantes:

- Los formatos de contrato de tipo concesional a largo plazo (BOT, BOD, BOO, DBO, DBOO), normalmente a 20-25 años, son a nivel internacional la mayoría para las grandes desaladoras aunque sin embargo estas fórmulas de participación público-privada han sido

muy poco utilizadas en España en el sector del agua, donde han predominado los EPC (diseño y construcción con o sin operación posterior).

- Las ratios de construcción oscilan entre 460 y 2.329 euros por cada m³/día instalado, con un valor medio de 1.121.
- En estas instalaciones hay evidentemente economías de escala, aunque los costes de inversión son más dependientes del país que del tamaño de la planta o su año de construcción. En países con elevados costes de mano de obra, las inversiones son muy superiores relativamente (como ocurre de forma muy evidente en Australia) a las de países como los de Oriente Medio, Norte de África o China.
- En los últimos 5 años ha habido una fuerte competencia en el sector (sobre todo por parte de empresas asiáticas o de Oriente Medio) llegando a ofrecer precios de agua desalada en formatos concesionales por debajo de los 0,5 €/m³, incluida la amortización de la instalación.

En la tabla anterior no se han incluido instalaciones de agua salobre, pero en general sus costes de inversión son muy inferiores debido a que ya no es necesario utilizar materiales de construcción anticorrosión (como las aleaciones de aceros duplex y superduplex de altísima calidad utilizadas para los bombeos y tuberías de alta presión) y se trabaja a presiones muy inferiores, por lo que los equipos e instalaciones representan una menor inversión. En el caso de las plantas de evaporación (que tampoco se han incluido en la tabla 1) los costes de inversión son todavía más elevados debido al uso de materiales anticorrosivos que además deben trabajar en condiciones de altas temperaturas (como el titanio).

Los costes de producción de agua desalada por ósmosis inversa tienen los siguientes componentes típicos:

- Costes fijos (que no dependen de la producción de la instalación):
 - Amortizaciones
 - Personal
 - Mantenimiento
 - Costes de administración, análisis, seguros, tasas e impuestos
 - Término fijo de la energía
 - Otros
- Costes variables (que son dependientes de la producción)
 - Término variable de la Energía

- Productos químicos
- Reposición de membranas
- Consumibles
- Extracción de residuos
- Componente variable del mantenimiento
- Costes ambientales (vigilancia ambiental, etc.)
- Otros

La proporción que representa cada uno de estos costes sobre el coste final del agua desalada tiene una composición más o menos típica y, a modo de ejemplo, ha sido analizada por Acuamed (Aguas de las Cuencas Mediterráneas, la empresa pública gestora de las grandes desaladoras en España) para las desaladoras españolas de agua de mar, con los siguientes resultados (De Miguel, 2019):

- Distribución de los costes totales: Amortización más costes financieros (19%), producción de agua (67%) y distribución de agua desalada (14%)
- Distribución de los costes de producción de agua desalada: Amortización más costes financieros (18%), operación y mantenimiento (19%), energía (61%) y otros (2%)
- Distribución de costes fijos/variables: Amortización más costes fijos (19%), costes fijos (21%), costes variables (60%).

Es de destacar el elevado porcentaje del coste que supone la energía en la producción de agua desalada, representando entre el 40 y el 60% de los costes de producción (Zarzo y Prats, 2018). Esto se debe al mayor consumo eléctrico que representa la bomba de alta presión para producir el agua desalada, como ya se comentó anteriormente.

De acuerdo a la experiencia del autor (con más de 100 instalaciones diseñadas y construidas), los costes de producción de agua típicos para grandes desaladoras de agua de mar en la actualidad están en el entorno de 0,4-0,6 €/m³, con valores que se incrementan hasta 0,8-1,2 €/m³ si incluimos la amortización, aunque como hemos visto nos encontramos en los últimos tiempos valores de licitación de grandes desaladoras internacionales por debajo de 0,5 dólares/m³ incluida amortización (tabla 1), lo cual implica una dudosa rentabilidad.

En la tabla 1 podemos encontrar asimismo valores de costes de producción de agua desalada entre 0,31 y 1,01 €/m³, con un promedio de 0,56 €/m³, que representan rangos de valores similares a los valores anteriores descritos. De acuerdo con datos procedentes de la Asociación Española de

Desalación y Reutilización (AEDyR, 2018), los precios medios de desalación de agua de mar en España actuales se encuentran entre 0,6 y 1 €/m³.

En aguas salobres los costes son muy inferiores debido al menor consumo de energía, con valores muy variables dependiendo de la salinidad, pero que pueden estar en el entorno de 0,15-0,3 €/m³, dependiendo de la salinidad del agua a tratar.

Los costes de operación están muy fuertemente influenciados por el tamaño de la instalación (economías de escala), las distancias entre captación, planta y distribución, y sobre todo por el coste de la mano de obra local y el precio de la energía en el país de implantación. Otro factor muy importante en el precio del agua es el factor de productividad; cuando nos alejamos del valor del 100% de producción, el precio por metro cúbico se incrementa dado que los costes fijos son independientes de la producción.

3. La desalación en España

3.1. Historia de la desalación en España

La desalación tiene unos orígenes mucho más antiguos de lo que se piensa habitualmente; las primeras referencias históricas nos remontan hasta Aristóteles o Plinio el Viejo, que ya desarrollaron estudios sobre desalación y los alquimistas egipcios, que usaban alambiques para destilación. Posteriormente las legiones romanas usaron evaporación solar para abastecerse de agua en sus campañas en África, almacenando agua en balsas de poca profundidad de las que se recogía posteriormente el agua condensada.

Los vikingos también usaron la tecnología de “capturadores de niebla”, utilizando las velas de los barcos para recoger el rocío o humedad ambiente durante sus travesías. Esta tecnología aún se utiliza en algunas zonas desérticas y todavía pueden verse en la actualidad en la cordillera andina.

En España, muchos de los avances científicos de los árabes, que también experimentaron con alambiques, llegaron a través de las universidades, como la de Toledo, incluyendo las tecnologías de destilación y evaporación (Gabbrielli, 2018). Posteriormente hay numerosas referencias de producción de agua en los barcos entre los siglos XV y XVII, por medio de dispositivos rudimentarios (destiladores alimentados por leña o carbón) hasta que la llegada de la revolución industrial, con el desarrollo de la máquina de vapor, introdujo la desalación por evaporación en los barcos de modo más tecnológico, y que se extendió posteriormente a aplicaciones industriales y pequeñas desaladoras.

El uso de las membranas es relativamente reciente; en 1748 el eclesiástico y físico francés Jean Antoine Nollet estudió el paso del agua a través de membranas semipermeables y algunos años más tarde Henri Dutrochet, médico, biólogo y fisiólogo francés, fundó la teoría celular y descubrió el proceso de la ósmosis. Ninguno de estos estudios resultó en aplicación práctica (y permanecieron casi como curiosidades de laboratorio) hasta los años 60, cuando los investigadores Sydney Loeb y Srinivasa Sourirajan desarrollaron en California las primeras membranas planas de ósmosis inversa de acetato de celulosa, abriendo así paso al desarrollo de las membranas comerciales que tuvieron su desarrollo a gran escala a partir de los años 80.

En España, la primera desaladora construida “en tierra” fue una pequeña desaladora de agua de mar en Lanzarote en el año 1964. Este fue el comienzo del desarrollo de la desalación en las Islas Canarias, que daría el salto posteriormente a las Islas Baleares y finalmente a la Península.

En los años 70 se instalaron diversas plantas en las islas Canarias, primero para hoteles y zonas turísticas y de ocio y luego ya en los años 80 para la agricultura, incluyendo las tecnologías de ósmosis inversa (de agua de mar y salobres) y la electrodiálisis reversible (para aguas salobres y residuales).

En los años 80 empiezan a construirse también algunas plantas para agua potable en la península incluyendo plantas de agua de mar y de salobre, que fueron progresivamente aumentando de tamaño.

En las provincias de Almería, Murcia y Alicante, con la sequía de los años 90, se instalaron alrededor de 300 unidades de plantas privadas para agricultura de pequeña producción (500-5.000 m³/día) (Zarzo *et al.* 2013). En aquel momento, la agricultura era extremadamente dependiente de los trasvases, y con la sequía, se buscaron otras alternativas como la desalación para la supervivencia del sector. En general se trataba de plantas desalando agua subterránea salobre, aunque se instalaron algunas de agua de mar en las Islas Canarias. La mayoría de estas instalaciones fueron con tecnología de ósmosis inversa, aunque en las Islas Canarias se construyeron alrededor de 20 plantas de electrodiálisis reversible, con tamaños entre 1.000-5.000 m³/día (Zarzo *et al.* 2013). Los agricultores del levante español continuaron incrementando la capacidad de desalación hasta construir plantas de tamaño importante, como las de las Comunidades de Regantes de Cuevas de Almanzora, Mazarrón o Rambla Morales.

Entre los años 2004 y 2011 el gobierno de España (por medio del Ministerio de Medio Ambiente, actual Ministerio de la Transición Ecológica) desarrolló el programa AGUA, con el fin de implantar un buen número de proyectos de desalación (alrededor de 25 plantas con capacidad cercana

a los 700 Hm³/año) en la costa Mediterránea para suplir el déficit hídrico de la región en contraposición a la política de trasvases promovida por los gobiernos anteriores. Esto supuso un enorme crecimiento de la desalación hasta la capacidad actual instalada, cifrada en alrededor de 5 millones de m³ al día, que si se destinasen íntegramente a la producción de agua potable podrían abastecer a una población de 34 millones de personas (AEDyR, 2018). En la actualidad se estima que en España hay más de 770 desaladoras mayores de 100 m³/día, con más de 100 mayores de 10.000 m³/día (AEDyR, 2018). Las mayores plantas de desalación de agua de mar en España son la de Torrevieja (240.000 m³/día) y Águilas (210.000 m³/día) y en el caso de aguas salobres, las potabilizadoras de El Atabal, en Málaga (200.000 m³/día) y Abrera, en Barcelona (200.000 m³/día), que además es la planta más grande del mundo con la tecnología de electrodiálisis reversible.

En la actualidad la mayor parte de las grandes desaladoras están en operación, aunque no al total de su capacidad. Algunas instalaciones, como la de Águilas, tienen importantes convenios con los regantes que garantizan su funcionamiento con un muy alto porcentaje de productividad (básicamente destinado a agricultura, para las Comunidades de Regantes de Lorca, Pulpí y Águilas), pero otras, como las de Muchamiel o Sagunto están muy infrautilizadas. En la tabla 2 puede verse el estado actual de las desaladoras de mayor tamaño en España (De Miguel, 2019).

Tabla 2. Situación actual de las grandes desaladoras de agua de mar de Acuamed (excepto Atabal, que es de agua salobre) en España

Desaladora	Demarcación	Provincia	Capacidad de producción (Hm ³ /año)	Estado de la actuación
Oropesa	Júcar	Castellón	18	Explotación sin producción
Moncófar	Júcar	Castellón	10	Explotación sin producción
Sagunto	Júcar	Valencia	8	Explotación sin producción
Mutxamel	Júcar	Alicante	18	Explotación
Torre Vieja	Segura	Alicante	40/80	Explotación
Valdelentisco	Segura	Murcia	48	Explotación
Águilas	Segura	Murcia	60	Explotación
Bajo Almanzora	Sur	Almería	0/15	En obra
Carboneras	Sur	Almería	42	Explotación
Campo de Dalías	Sur	Almería	30	Explotación
Marbella	Sur	Málaga	20	Explotación
Atabal	Sur	Málaga	60	Explotación
Total			354/394/409	

La mayor parte de las pequeñas plantas desaladoras construidas por Comunidades de Regantes o agricultores particulares en los años 90 están en la actualidad fuera de operación debido a diversos motivos (falta de autorizaciones, problemas de gestión de salmueras, etc.) pero en los últimos años agrupaciones de empresarios agrícolas de las provincias de Murcia y Almería están planeando proyectar varias grandes desaladoras de agua de mar propias para reducir su dependencia de los trasvases.

Aparte de las instalaciones de agua de mar, es de destacar la creciente implementación de membranas de desalación para la mejora de las aguas superficiales (incluso en grandes plantas, como las ETAP del Tajo, El Atabal y Abrera) y también para tratamientos terciarios de aguas residuales (como las de las EDAR de Rincón de León en Alicante o la EDAR de Benidorm).

3.2. La desalación para agricultura en España

Mientras que el uso del agua desalada para la agricultura es una actividad prácticamente irrelevante a nivel mundial, no representando más del 2% del total de los usos (IDA, 2015), España es una rareza en este sentido, siendo el país de mayor utilización para esta aplicación, con valores superiores al 21% (Zarzo *et al.*, 2013).

En España, el déficit hídrico estructural ha llevado a las Comunidades de Regantes y empresas agrícolas del levante español a contar con la desalación como parte de sus recursos de agua, integrando aguas superficiales procedentes de trasvases, aguas subterráneas, agua reutilizada y agua desalada (salobre y de mar), obteniendo además así un precio razonable gracias a la mezcla de todos estos aportes. Además, los altos retornos de inversión de los cultivos de invernadero, altamente tecnificados con productos “fuera de temporada”, hacen que el coste del agua desalada sea asumible dentro de los costes de producción para este sector de productos de alta calidad.

Debemos destacar asimismo que está demostrado que el uso del agua desalada para la agricultura incrementa la productividad y la calidad de los productos. Por ejemplo, en un estudio propio del año 1997 no publicado, observamos que, sustituyendo el agua subterránea utilizada hasta aquel momento por agua desalada se incrementaba la producción para naranjas de la variedad Navel entre valores del 10 al 50%, reduciéndose además en un 20% la cantidad de agua requerida.

La desalación para agricultura tiene una serie de peculiaridades que la hacen diferente a la aplicación a otros usos, como son sus menores requerimientos en la calidad del agua y de post-tratamiento, en mano de obra, productos químicos y reemplazo de membranas, capacidad para regular la producción gracias a los sistemas de almacenamiento (pudiendo así aprovechar tarifas eléctricas más favorables) y simplicidad. Estas medidas permiten por ello obtener unos costes más reducidos que las plantas diseñadas para la producción de agua potable para abastecimiento (que deben contar además con otras medidas de seguridad adicionales).

Frente a todas las ventajas de la desalación para agricultura también hay algunos inconvenientes (en este caso de origen químico), como la presencia de Boro en el agua de mar (y en menor medida el agua producto) que es tóxico para algunos cultivos, y cuya eliminación supone sobrecostes, así como el desequilibrio químico del agua, representado por el SAR (la relación de absorción de sodio), que, en caso de ser elevado (como en las aguas desaladas sin remineralizar) implica riesgo de impermeabilización de los suelos. En general ambos problemas se resuelven en el caso de la aplicación agrícola por medio de la mezcla de aguas de diferentes orígenes, reduciendo adicionalmente el coste global del agua producida. En la Tabla 3, podemos observar los distintos aportes y precios de

agua correspondientes a una Comunidad de Regantes de la provincia de Almería, incluyendo el suministro de agua desalada.

Tabla 3. Dotaciones, precios y mezclas de agua en una Comunidad de Regantes en Almería

Fuente de agua	Dotación (Hm ³ /año)	Conductividad del agua (μS/cm)	Coste del agua (€/m ³)
Trasvase Tajo-Segura	5,32	2.000	0,11
Trasvase Negratín	5	1.300	0,23
Subtotal	10,32	1.661	0,17
Pozos	1,5	3.500	0,09
Agua desalada	4,5	300	0,34
Subtotal con agua desalada	16,32	1.455	0,21

Fuente: elaboración propia

En la Tabla 4 podemos observar el gran crecimiento que ha tenido el uso del agua desalada para la agricultura en los últimos años. Aunque se trata únicamente de la producción de las grandes desaladoras de agua de mar de Acuamed (no considerando otras plantas privadas propiedad del sector agrícola), si nos da una idea de la magnitud y crecimiento de esta aplicación.

Tabla 4. Producción de agua desalada de las grandes desaladoras de Acuamed en el Mediterráneo Español (en Hm³/año) para distintos usos

	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
P	0,00	10,06	49,21	49,67	54,46	59,50	47,67	45,14	50,99	42,56	51,72	52,17	64,70	93,08	103,7
A	0,00	0,53	2,27	2,42	3,54	7,37	13,16	17,28	19,02	37,47	47,30	79,56	125,6	141,5	135,8
I	0,00	0,20	0,29	0,25	0,31	0,37	0,50	0,53	2,25	2,49	2,09	2,53	2,47	2,81	2,14
T	0,00	10,8	51,8	52,3	58,3	67,2	61,3	62,9	72,3	82,5	101	134	193	237	242

Fuente: adaptado de (De Miguel, 2019) (P = potable, A= agricultura, I = industria, T= totales)

De acuerdo con los datos de la Tabla 2, las plantas de Acuamed han producido un total de 1.426 Hm³de agua desalada desde el comienzo de su puesta en marcha en 2005 hasta 2018, representando el uso agrícola un 43% de esta producción. Se observa que esta proporción ha ido creciendo (y sigue creciendo) y en el año 2018 ya suponía un 55%.

La opinión generalizada, y la de los propios agricultores que usan el agua desalada, es que el agua desalada es cara. En realidad, es evidente que solo ciertos productos pueden permitirse el uso de agua desalada como única fuente de suministro (por el precio del producto y por el porcentaje que representa el agua en sus costes de producción) y hay algunos productos para los que resultaría totalmente inviable. Teniendo en consideración los costes del agua desalada anteriormente expuestos, es interesante observar la productividad del agua para diferentes cultivos (Tabla 5), estudiada en la Cuenca del Segura (Aldaya *et al.*, 2019), donde podemos ver que algunos cultivos tienen una altísima productividad de cada m³ de agua, pudiendo permitirse el uso de un agua de precio más elevado, como la desalada.

Tabla 5. Productividad del agua para diferentes cultivos en la Cuenca del Segura

Cultivo	Rendimiento (Kg/ha/año)	Huella hídrica total (L/kg)	Precio (€/Kg)	Productividad económica de la tierra (€/ha/año)	Productividad económica del agua (€/m ³)
Arroz	4.950	2.283	0,3	1.318	0,15
Patata	33.600	199	0,2	7.716	1,98
Alfalfa	70.000	121	0,1	9.691	1,15
Hortícolas protegidos	85.000	80	0,6	48.531	6,97
Hortícolas al aire libre	37.000	199	0,4	14.536	3,11
Frutales fruto carnoso	21.000	350	0,5	11.444	2,48
Algodón	2.000	4.321	0,3	721	0,17
Cítricos	30.000	257	0,2	7.000	1,38
Almendras	1.100	4.454	1,0	1.112	0,51
Viñedos vino/mesa	3.600/25.000	1.073/247	0,6/0,6	2.067/14.999	1,64/3,99
Olivar	7.600	485	0,5	3.905	3,90

Fuente: adaptado de (Aldaya *et al.*, 2017)

La productividad económica del agua representa el rendimiento económico que obtenemos por cada m³ de agua suministrada, por lo que aquellos productos con valores de productividad superiores a 1 €/m³, podrían teóricamente soportar el precio del agua desalada procedente del mar, y aquellos superiores a 0,3 podrían soportar el precio del agua desalada salobre.

Este hecho podría tener asimismo influencia futura sobre las tendencias en el mercado de producción agrícola en la zona, teniendo en cuenta los precios de los productos y la productividad y disponibilidad del agua. De acuerdo con el informe citado (Aldaya *et al.*, 2017) en la Cuenca del Segura, los cultivos con mayor consumo de agua son por este orden; cítricos (35%), hortícolas a cielo abierto (32%) y frutas (17%), con productividades medias (1,4, 3 y 2,5 €/m³, respectivamente). Estos cultivos juntos representan 3,5 veces más consumo de agua que el resto de los cultivos. Los hortícolas en invernadero (tomates, lechuga, etc.) consumen solo el 5% del agua en esta cuenca, y teniendo la

más alta productividad económica (7 €/m³), solo representan el 3% de la agricultura de regadío y el 14% del valor económico de la superficie de regadío.

Como vemos, el precio del agua es siempre el factor determinante a la hora de utilizar el agua desalada, siempre que no se cuente con otras fuentes más baratas, ya que éstas son siempre las primeras en utilizarse (hecho que ocurre también con el suministro de agua potable, motivo por el cual hay plantas públicas infrautilizadas). En un estudio realizado sobre distintas encuestas a regantes en el Campo de Níjar (Almería) (Aznar *et al.*, 2017), se observó que las medidas más importantes para promover el agua desalada en agricultura en la zona, según los usuarios, serían, en este orden, las subvenciones y descuentos en los precios, la reducción de impuestos o de volúmenes y por último una campaña de información sobre sus beneficios.

El agua desalada para agricultura ha sido subvencionada por la administración en algunas ocasiones, suministrando agua desalada por debajo de su coste de producción (lo cual iría en contra de la Directiva Marco del Agua Europea y la recuperación de costes). Por ejemplo, en el Campo de Cartagena, los regantes pagaron el agua en el periodo de octubre de 2015 a abril de 2016 a 0,36-0,39 €/m³, mientras que en el semestre anterior lo había pagado a 0,14-0,17 €/m³ (agua procedente de otros orígenes) debido en el primer caso al uso de agua desalada subvencionada (Martinez *et al.*, 2016). Los autores indican asimismo en el artículo que, si no se hubiese contado con dicha subvención, el precio podría haber rondado los 0,65 €/m³, lo cual no podrían haber soportado todos los cultivos.

Debemos destacar también que el uso del agua desalada para agricultura en España ha llamado la atención de muchos otros países interesados en esta aplicación y ha habido numerosas delegaciones internacionales visitando diversas plantas de desalación y regadíos. Un ejemplo de estos países es Australia, donde se han realizado estudios sobre la viabilidad de la aplicación y donde ya hay algunos proyectos en marcha (Burnet *et al.*, 2015).

4. La innovación en desalación

Como se comentó anteriormente, el sector español de la desalación es líder internacionalmente, con un gran número de empresas entre las primeras del mundo. Esta fortaleza no se debe solo a grandes constructores y operadores, sino que incluye también a suministradores, ingenierías y consultoras, pequeñas y medianas empresas, emprendedores, empresas públicas y centros de investigación.

En España hay numerosos centros de investigación y universidades que son referentes internacionales en investigación sobre desalación. En general, las tendencias sobre investigación en este sector están orientadas hacia la eficiencia energética y la reducción de huella de carbono, la reducción de los impactos de la desalación y la mejora de equipos (membranas) e instalaciones, es decir, son en general aplicadas y se centran más en la reducción de costes e impactos que en el desarrollo de nuevos procesos o tecnologías.

En el campo de la eficiencia energética y la reducción de la huella de CO₂, se están asimismo incrementando los esfuerzos en investigación, así como en la implantación de energías renovables, bien para la producción de la energía eléctrica necesaria para la desalación, o bien para intentar acoplarlas directamente a sistemas de desalación. En este sentido, la extensión de las energías renovables para desalación se encuentra con algunas dificultades como son las elevadas potencias concentradas en algunos puntos (grandes desaladoras), la imposibilidad técnica o económica de almacenar energía (cuando las desaladoras deben producir en continuo para su viabilidad) o el hecho de que la ubicación de la desaladora no tiene porque coincidir exactamente con el mejor lugar para la producción de la energía renovable. Este último problema se ha resuelto en algunos países (España, Australia) suministrando la energía renovable necesaria equivalente desde parques que pueden estar situados a cientos de kilómetros de la desaladora, compensando las emisiones de ésta.

5. Futuro de la desalación en España

La desalación en España se ha convertido en los últimos años en un aporte adicional de agua necesario para complementar a las fuentes tradicionales de suministro. En la actualidad, no es previsible a corto plazo la implantación de grandes desaladoras de agua de mar en la costa Mediterránea (salvo quizá las privadas promovidas por Comunidades de Regantes), ya que las necesidades están cubiertas por las desaladoras actuales salvo quizá algún municipio costero que pueda tener problemas puntuales de falta de suministro. Esta situación podría modificarse en el futuro si se incrementa el calentamiento global y los efectos del cambio climático (como parece que va a ocurrir) e incluso regiones tradicionalmente sin necesidades de agua podrían necesitar la implantación de desaladoras.

La situación es diferente en el caso de desaladoras para la mejora de la calidad de las aguas continentales; con el fin de garantizar la calidad y la creciente exigencia de las legislaciones de agua potable, la implementación de membranas en dichas plantas va a ser cada vez más frecuente y todavía

con mayor razón para afrontar los retos técnicos de los nuevos contaminantes emergentes, los riesgos microbiológicos (como las superbacterias o virus como el COVID-19) y los microplásticos.

En este sentido, cabe destacar como ha enfrentado el sector la crisis sanitaria reciente (y no finalizada), garantizando el suministro de agua potable y el saneamiento durante el periodo de confinamiento. Además de la garantía de calidad del agua potable tratada convencionalmente en los países avanzados gracias a los sistemas de desinfección (la OMS y otros organismos han emitido informes en este sentido (OMS, 2020), en el caso de la desalación, adicionalmente las membranas son una barrera infranqueable para los virus por lo que la seguridad microbiológica está totalmente garantizada.

En otro orden de cosas, la nueva regulación europea para armonizar la legislación del uso de aguas regeneradas para la agricultura que ha sido aprobada en primera lectura por el Consejo de Europa el pasado 7 de abril, hará también que se incremente la instalación de plantas de membranas como tratamiento terciario de aguas residuales para garantizar la calidad requerida, lo implica un importante crecimiento del sector. Adicionalmente, en países como Estados Unidos, Singapur o Israel las aguas regeneradas están siendo incorporadas al suministro de agua potable tras su desalación (cosa que está actualmente prohibida en España por ley, salvo casos de emergencia), lo cual no es descartable que pueda ocurrir también en España en el futuro.

6. Conclusiones

España ha apostado en los últimos tiempos a nivel gubernamental por la aplicación de la desalación incorporándola a la planificación hidrológica solucionando gran parte de los problemas de abastecimiento en toda la costa mediterránea y las islas Canarias y Baleares, lo cual ha sido complementado por otras actuaciones públicas y privadas, industrias, así como la importante implantación para el sector agrícola.

El uso de agua desalada como complemento a otros recursos convencionales es una garantía de suministro de agua de calidad que no está sujeta a la influencia del clima, cambio climático o las tensiones territoriales o políticas a las que están sujetas los trasvases.

Como contrapartida a estas ventajas, sus detractores indican que el agua producida es cara, que tiene un importante consumo energético e impacto ambiental. Las evidencias técnicas, económicas y científicas desmontan estas teorías evidenciando que la desalación es una alternativa viable y sostenible económica y ambientalmente para multitud de usos del agua, incluyendo el agrícola, donde

además su aplicación no cesa de crecer. Respecto al consumo de energía y los potenciales impactos ambientales, el consumo se ha ido reduciendo hasta valores muy reducidos en los últimos años y cuando los proyectos se ejecutan y operan adecuadamente (como es en la mayoría de los casos en España), los impactos son prácticamente indetectables.

España comenzó su historia desalando hace ya casi 60 años con pequeñas instalaciones en las Islas Canarias; esta implantación, que ha ido creciendo con el tiempo y sobre todo las grandes desaladoras del programa AGUA, han hecho de la desalación española y su industria un referente a nivel mundial y un ejemplo para muchos países.

Para finalizar, me gustaría citar a John F. Kennedy, presidente de los Estados Unidos entre 1961 y 1963, que en un discurso el 12 de abril de 1961 ya indicó la importancia y relevancia de la desalación para nuestro futuro:

"If we could ever competitively, at a cheap rate, get fresh water from salt water, that it would be in the long-range interests of humanity which would really dwarf any other scientific accomplishments. I am hopeful that we will intensify our efforts in that area"

“Si pudiéramos obtener, de forma barata, agua potable a partir de agua salada, ese sería en los intereses de la humanidad a largo plazo el que realmente eclipsaría cualquier otro logro científico. Tengo la esperanza de que intensificaremos nuestros esfuerzos en esa área”

Bibliografía

AEDyR (2018). “Desalación en España en primera persona. De hitos pioneros a referente internacional”. Informe Asociación Española de Desalación y Reutilización, 2018.

Aldaya, M.M., Custodio, E., De Stefano, I, Díaz-Alcaide, S., Fernández, M.F., López-Gunn, E., Llamas, M.R., Rica, M. y Willaart, B. (2017). “Análisis académico del plan hidrológico de la demarcación hidrográfica del Segura 2015-2021 a la luz de modernos conceptos de la ciencia de los recursos de agua”. Edit. Fundación Botín, Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales y Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (2017).

Aznar, J.A., Belmonte, L.J. y Valera, D.L. (2017). “Perceptions and acceptance of desalinated water for irrigation: a case study in the Níjar district (Southeast Spain)”. Water 2017, 9, 408, 2017

Burn, S., Hoang, M., Zarzo, D., Olewniak, F., Campos, E., Bolto, B., y Barron, O. (2015). "Desalination Techniques – A review of the opportunities for desalination in agriculture". *Desalination*. Volume 364, p. 2-16, 15 May 2015.

Cosin, C. (2019). "La evolución de las tarifas en desalación. Parte I". *Revista iAgua*, enero 2019.

De Miguel, J. (2019). "Situación actual y futuras actuaciones en las desaladoras gestionadas por Acuamed". Congreso Nacional del Agua. Depuración, reutilización y desalinización. 22 de febrero 2019, Orihuela.

FAO (2004). "Water desalination for agricultural applications", Proceedings of the FAO Expert Consultation on Water Desalination for Agriculture Applications, 26–27 April, Rome, 2004.

Gabrielli, E. (2018). "La desalinización desde el comienzo hasta el final de la Edad Media". XII Congreso Internacional de la Asociación Española de Desalación y Reutilización (AEDyR), Toledo, Octubre 2018.

IDA (2015). "IDA Yearbook, 2014-2015". Ed. GWI/IDA/Water Desalination Report, 2015

IDA (2019). "IDA Water Security Handbook, 2018-2019". Ed. GWI/IDA/Water Desalination Report, 2019

Martinez, V., Soto, M., Lopez de Meneses, J.U, y Zarzo, D. (2016). "Uso agrario sostenible de agua desalinizada". *Agricultura*, núm. 999, octubre 2016. Pág. 872-875.

OMS (2020). Informe técnico "Gestión de Agua, saneamiento, higiene y residuos para COVID-19". Organización Mundial de la Salud (OMS), 3 de marzo de 2020

Sola, I., Zarzo, D. y Sanchez-Lizaso, J.L. (2019). "Evaluating environmental requirements for the management of brine discharges in Spain". *Desalination* 471, 2019, 1-9

WHO/SDE/WSH (2007). "Desalination for safe water supply. Guidance for the health and environmental aspects applicable to desalination". Public Health and the Environment. World Health Organization, Geneva 2007"

Zarzo, D., Campos, E. y Terrero, P. (2013). "Spanish experience in desalination for agriculture". *Desalination and water treatment*. Vol. 51 (1-3), 53-56 (2013)

Zarzo, D. y Prats, D. (2018). "Desalination and energy consumption. What can we expect in the near future? *Desalination* 427, 2018, 1-9

Zarzo, D. (2018). "Beneficial uses of reverse osmosis brines". Capítulo del Libro "Emerging Technologies for Sustainable Desalination Handbook". Ed. Veera Ganeswar Gude. Editorial Butterworth-Heinemann (Elsevier).