

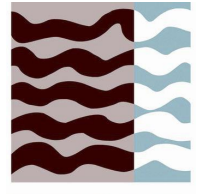


Universidad  
Politécnica  
de Cartagena



UPCT

Escuela Técnica Superior de  
Ingeniería Agronómica



ETSIA

*Grado en Ingeniería Agroalimentaria  
y de Sistemas Biológicos*

Estudio económico y medioambiental de la  
integración de agua marina desalinizada para el  
riego de cultivos característicos de la Cuenca del  
Segura.

**Autor:** D Tomás Camacho García

**Dirección:** Dña Belén Gallego Elvira

**Codirección:** D Victoriano Martínez Álvarez

Cartagena, abril de 2022

# ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>RESUMEN</b> .....	<b>4</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>5</b>
<b>1.INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>6</b>
<b>1.1. Importancia socio-económica de la agricultura de regadío</b> .....	<b>6</b>
<b>1.2. Necesidad de la integración de recursos no convencionales para la sostenibilidad del regadío en la Cuenca del Segura</b> .....	<b>8</b>
<b>1.3. Aspectos a considerar en el riego con agua marina desalinizada</b> .....	<b>11</b>
1.3.1. Aspectos económicos .....	11
1.3.2. Aspectos agronómicos.....	12
1.3.2. Aspectos medioambientales .....	13
<b>2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO</b> .....	<b>15</b>
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....	<b>16</b>
<b>3.1. Cultivos seleccionados</b> .....	<b>16</b>
<b>3.2. Escenarios de suministro hídrico</b> .....	<b>16</b>
<b>3.3. Herramienta de optimización de fertilizantes y costes Irriblend-DSW</b> .....	<b>17</b>
<b>3.4. Datos de entrada para simulaciones con Irriblend-DSW</b> .....	<b>20</b>
<b>3.5. Cálculo de emisiones</b> .....	<b>23</b>
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	<b>25</b>
<b>4.1. Análisis de costes de agua y fertilizantes para los escenarios teóricos de suministro hídrico</b> .....	<b>25</b>
<b>4.2. Optimización del fertirriego para escenario actual</b> .....	<b>27</b>
4.2.1. Lechuga.....	28
4.2.2. Limón .....	31
<b>4.3. Análisis de reducción de suministro del trasvase</b> .....	<b>34</b>
4.3.1. Lechuga.....	34
4.3.2. Limón .....	36
<b>4.4. Estimación de emisiones para los diferentes escenarios de suministro hídrico</b> .....	<b>37</b>
<b>5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	<b>39</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>40</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1. Principales características de las plantas desaladoras de la Cuenca del Segura en 2017.....</b>	<b>10</b>
<b>Tabla 2. Necesidades nutricionales de la lechuga. ....</b>	<b>20</b>
<b>Tabla 3. Necesidades nutricionales del limón. ....</b>	<b>20</b>
<b>Tabla 4. Fuentes de agua. ....</b>	<b>20</b>
<b>Tabla 5. Umbral de salinidad del cultivo y factor de reducción del rendimiento del cultivo.....</b>	<b>21</b>
<b>Tabla 6. Composición (mmol/g) y precio de los fertilizantes comerciales utilizados. 12</b>	<b>21</b>
<b>Tabla 7. Índices de productividad y rentabilidad de los cultivos.....</b>	<b>22</b>
<b>Tabla 8. Precio mínimo, medio, y máximo percibidos por los agricultores en los últimos 10 años. ....</b>	<b>22</b>
<b>Tabla 9. Datos económicos (costes de inversión, costes operacionales, umbral de rentabilidad) de los cultivos seleccionados. Todos los datos expresados en €/ha año. ....</b>	<b>23</b>
<b>Tabla 10. Combinación de agua, abonos seleccionados, solución nutritiva e indicadores de rentabilidad para la mezcla de agua óptima calculada por Irriblend-DSW para los cultivos de lechuga NFT y limón.....</b>	<b>27</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de la superficie de regadío en España 2002-2020.....	6
Figura 2. Porcentaje de hectáreas de los principales cultivos en regadío respecto a la superficie total en regadío de la Región de Murcia en 2020. ....	7
Figura 3. Porcentaje de las exportaciones de la Región de Murcia en 2020 según tipo de producto. ....	7
Figura 4. Proyecciones de estrés hídrico por país para el año 2040. ....	8
Figura 5. Consumo neto trasvasado y de regadío del trasvase Tajo-Segura en los últimos 30 años. ....	9
Figura 6. Localización de plantas desaladoras de agua marina que suministran agua para la agricultura en la Cuenca del Segura. ....	10
Figura 7. Desglose del consumo de energía (kW/m <sup>3</sup> ) para las diferentes etapas de producción y distribución de AMD para riego en el Sureste de España en 2017. ....	11
Figura 8. Esquema y diagrama de flujo de Irriblend-DSW. ....	19
Figura 9. Estructura de la generación con/sin emisiones CO <sub>2</sub> eq. (%) y factor de emisión de CO <sub>2</sub> eq. asociado a la generación de energía eléctrica nacional para el periodo 2012-2021. ....	24
Figura 10. PPI, beneficio potencial y umbral de rentabilidad de ambos cultivos para los escenarios de suministro hídrico ES1, ES2 y ES3 y precios de venta mínimo, medio y máximo .....	25
Figura 11. Gráfico 3D que relaciona el PPI y los porcentajes utilizados en la mezcla de aguas para el cultivo de lechuga NFT.....	30
Figura 12. Gráfico 3D que relaciona el PPI y los porcentajes utilizados en la mezcla de aguas para el .....	33
cultivo de limón.....	33
Figura 13. Evolución del PPI y beneficio de la mezcla óptima en lechuga según la disponibilidad de agua del TTS.....	35
Figura 14. Evolución de la CE y coste de solución de riego de la mezcla óptima en lechuga según la disponibilidad de agua del TTS.....	35
Figura 15. Evolución del PPI y beneficio de la mezcla óptima en limón según la disponibilidad de agua del TTS.....	36
Figura 16. Evolución de la CE y coste de solución de riego de la mezcla óptima en limón según la disponibilidad de agua del TTS.....	37
Figura 17. Proyección de las emisiones de kgCO <sub>2</sub> eq/m <sup>3</sup> asociadas a la implementación de AMD para 2021-2030 en los escenarios supuestos.....	38

## RESUMEN

En este trabajo se ha realizado un estudio de la viabilidad económica de la integración de agua marina desalinizada (AMD) para el riego en el sureste español, así como su posible repercusión en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). En concreto, se ha evaluado el impacto de la sustitución parcial y total de los recursos hídricos convencionales por AMD en dos cultivos representativos de los regadíos de la Cuenca del Segura.

La escasez de recursos hídricos de la Cuenca del Segura y las crecientes limitaciones en el suministro de agua del Trasvase Tajo-Segura (TTS), suponen una gran amenaza para la agricultura de regadío. Esta situación ha dado lugar a la incorporación de recursos no convencionales para el riego en la zona, entre los que se destaca el AMD, que se ha implantado masivamente en la última década. El AMD proporciona un suministro de agua regular y sin limitaciones climatológicas e hidrológicas, pero con un elevado coste económico y energético. Además, dada su singular composición química, el uso para riego requiere de un adecuado manejo para evitar problemas agronómicos.

Se seleccionaron la lechuga y el limón como objeto de estudio, ya que son cultivos representativos muy extendidos en la zona. Para la lechuga se seleccionó un sistema hidropónico de alto rendimiento y para el limón un cultivo tradicional en suelo, dada su gran diferencia desde el punto de vista económico en términos de capital de inversión y beneficio potencial. Para cada caso, se han estudiado diferentes escenarios de disponibilidad hídrica y se ha identificado la combinación de recursos hídricos más rentable, atendiendo a las limitaciones actuales de suministro. Para cada escenario, se estimaron las emisiones de GEI atendiendo al consumo energético del suministro de agua y el factor de emisión de generación de energía. También se estudió la posible reducción de emisiones ligada al aumento de las energías renovables en el mix energético nacional, esperado para los próximos años.

Los resultados del estudio ponen de manifiesto que para un escenario en el que todo el suministro hídrico fuera AMD, el beneficio de la lechuga en hidroponía se reduciría un 13%, mientras que el limón tradicional la reducción sería del 53%, tomando como referencia el precio de mercado medio de los últimos años. En la situación actual, con disponibilidad de otras fuentes de agua como el agua subterránea salobre (ASS) y una limitación del 30% en la disponibilidad de agua del TTS, la combinación óptima fue 30% TTS; 50% AMD; 20% ASS para limón y 30% TTS; 55% AMD; 15% ASS para lechuga. El impacto económico que supone la incorporación de AMD puede ser asumido en el caso de cultivos de alta rentabilidad como la lechuga en hidroponía, pero puede resultar en pérdidas en cultivos con estrechos márgenes de beneficio como el limón.

En relación a las emisiones de GEI, la incorporación del AMD supondría un aumento de emisiones de hasta 0,26 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>3</sup>, pero podrían reducirse un 44%, hasta 0,15 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>3</sup> en 2030 y alcanzar la neutralidad en 2050, si se cumplen los objetivos de reducción de emisiones en la generación de energía.

## ABSTRACT

This work assesses the economic viability of the integration of desalinated seawater (DS) for irrigation in southeast Spanish, as well as its possible impact on greenhouse gas (GHG) emissions. Specifically, the impact of the partial and total substitution of conventional water resources by DS in two representative irrigated crops in the Segura River Basin has been evaluated.

The scarcity of water resources in the Segura River Basin and the growing water supply limitations of the Tagus-Segura water transfer (TSWT), entail a great threat to agricultural activity. This situation has led to the incorporation of unconventional resources for irrigation in the area, among which DS stands out after been massively implemented in the last decade. The DS provides a regular supply of water without climatological and hydrological limitations, but with a high economic and energy cost. In addition, given its unique chemical composition, its use for irrigation requires proper management to avoid agronomical problems.

Lettuce and lemon were selected as the object of study, since they are representative crops that are widespread in the area. A high-yield hydroponic system was selected for lettuce and a traditional soil cultivation for lemon, given its great difference from the economic point of view in terms of investment capital and potential profit. For each case, different water availability scenarios have been studied and the most profitable combination of water resources has been identified, taking into account current supply limitations. For each scenario, GHG emissions were estimated referring the energy consumption of the water supply and the emission factor of power generation. The possible emissions reduction linked to the increase in renewable energies in the national energy mix expected for the coming years will also be studied.

The results of the study show that for a scenario in which all the water supply was DS, the benefit would be reduced by 13% in hydroponic lettuce while that of traditional lemon by 53%, taking as a reference the average market price of the last years. In the current situation with the availability of other water sources such as brackish groundwater (BGW) and a limitation of 30% in the availability of TSWT water, the optimal combination was 30% TSWT; 50% DS; 20% BGW for lemon and 30% TSWT; 55% DS; 15% BGW for lettuce. The economic impact of the incorporation of DS can be assumed in the case of highly profitable crops such as hydroponic lettuce, but it can result in losses in crops with narrow profit margins such as lemon.

In relation to GHG emissions, the incorporation of the DS would mean an increase in emissions up to 0.26 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>3</sup>, which could be reduced by 44%, down to 0.15 kgCO<sub>2</sub>eq/m<sup>3</sup> in 2030 and reach neutrality in 2050, if the emission reduction targets for power generation are met.

## 1.INTRODUCCIÓN

### 1.1. Importancia socio-económica de la agricultura de regadío

La agricultura debe enfrentarse al gran reto de pasar de alimentar a 7.700 millones de habitantes en 2019 a 9.700 millones en 2050 (Naciones Unidas, 2019). Como consecuencia, se estima un aumento en la demanda de productos agrarios de un 1,1% anual hasta 2050 (Alexandratos & Bruinsma, 2012). Se trata de un gran desafío para la agricultura de regadío, especialmente teniendo en cuenta que la disponibilidad de agua se reducirá por el cambio climático (Kundzewicz y Colaboradores, 2008), y que actualmente el 70% de las extracciones ya están destinadas al uso agrícola (Huang y Colaboradores, 2019).

En España el Valor Añadido Bruto (VAB) de la producción agraria fue de 26.556 millones de euros en 2019, lo que representa el 2,7 % del PIB y el 3,9% del empleo de la población total ocupada. España es el segundo país de la UE15 por valor de la Renta Agraria, destacando la importancia y el gran valor generado por la producción agraria. La superficie de regadío en España ha ido aumentando significativamente en los últimos años (Figura 1), en 2020 fue de 3.815.447 ha, siendo un 23% de la superficie total cultivada.

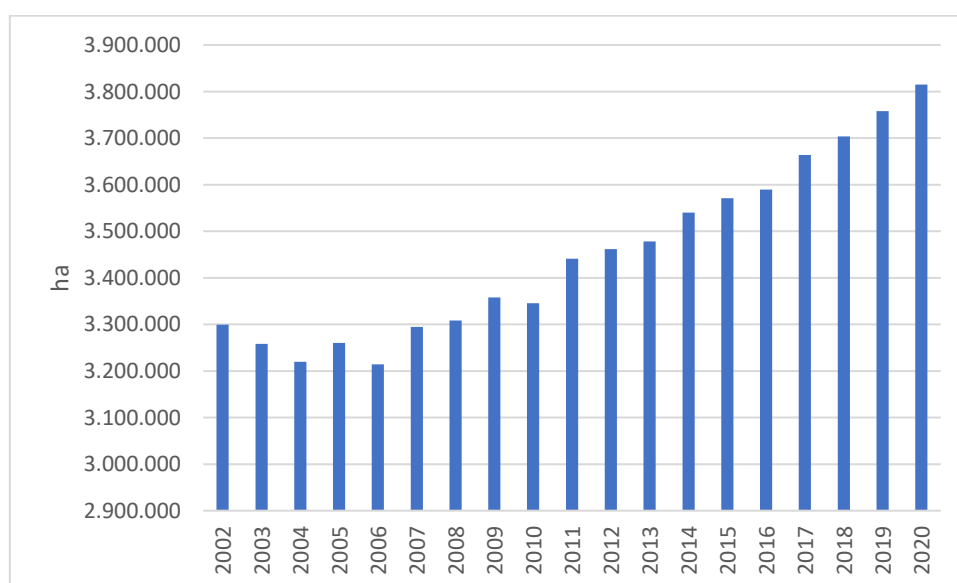


Figura 1. Evolución de la superficie de regadío en España 2002-2020.

Fuente: Datos del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

Para la Región de Murcia, el sector agrícola es un pilar fundamental de la economía, lo que se ve reflejado en el Producto Interior Bruto (PIB) regional, dónde aporta más de un 20%, lo que supone un total de 32.670 millones de euros en 2019. Así, el sector agroalimentario cuenta con más de 90.000 afiliados a la seguridad social en más de 4.300 empresas (Murciaplaza, 2020). En 2020, los diez principales cultivos de regadío en

la Región de Murcia supusieron dos terceras partes de las 164.216 ha cultivadas en regadío (Figura 2). Los productos agroalimentarios supusieron el 66% del valor de las exportaciones de la Región en 2020 (Figura 3), cuyo destino principal fueron otros países de la UE. Estos datos señalan su gran relevancia para la economía regional.

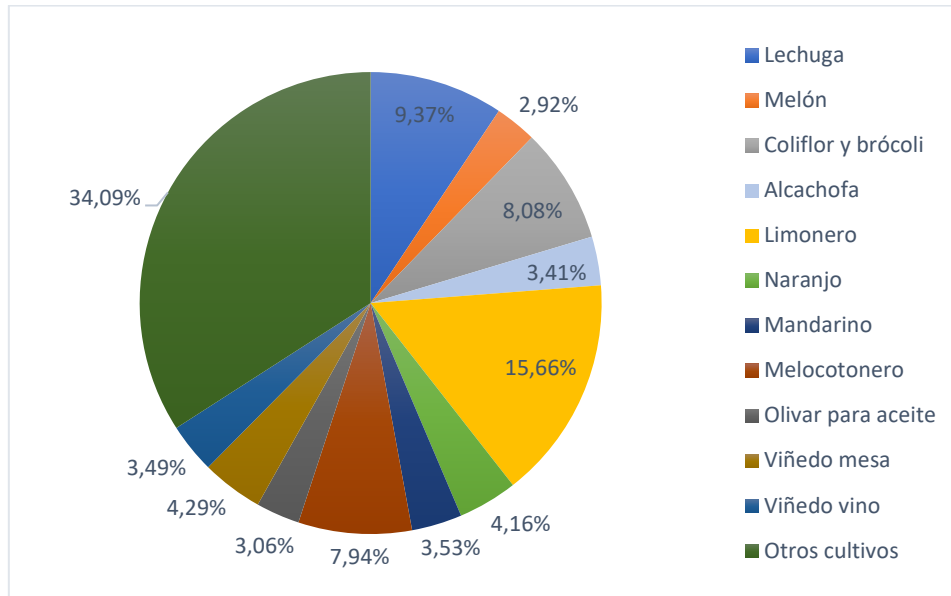


Figura 2. Porcentaje de hectáreas de los principales cultivos en regadío respecto a la superficie total en regadío de la Región de Murcia en 2020.  
Fuente: Datos de la CARM.

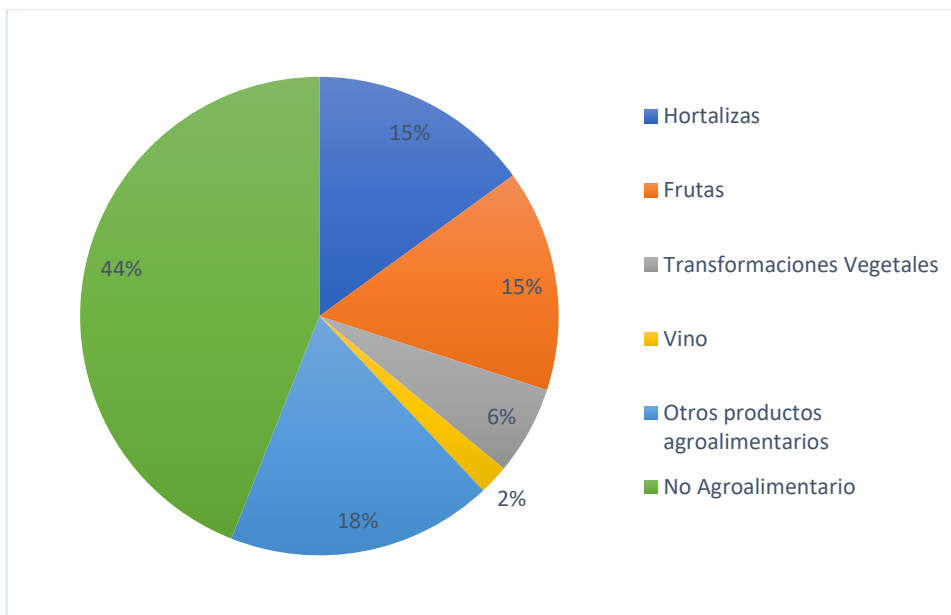


Figura 3. Porcentaje de las exportaciones de la Región de Murcia en 2020 según tipo de producto.  
Fuente: Datos de la CARM.



## 1.2. Necesidad de la integración de recursos no convencionales para la sostenibilidad del regadío en la Cuenca del Segura

La sequía es uno de los fenómenos ambientales con mayor impacto económico y notoriamente el que a más población afecta (Cashman y Colaboradores, 2018). Las sequías están aumentando en severidad y frecuencia en muchas regiones del mundo debido a la variabilidad de las precipitaciones y al aumento de la temperatura por el cambio climático (Shukla y Colaboradores, 2019).

El incremento de la población mundial, la mejora de los estándares de vida, cambios en los patrones de consumo y la expansión de la agricultura de regadío son las principales causas del aumento de la demanda de agua (Ercin y Colaboradores, 2014). En teoría, habría suficiente agua a nivel global como para cubrir la demanda, sin embargo, la gran variación tanto temporal como espacial en su demanda y disponibilidad provoca la escasez de este recurso en numerosas partes del mundo durante ciertas épocas del año (Mekonnen y Colaboradores, 2016).

Según el World Resources Institute, España podría alcanzar un nivel de estrés hídrico superior al 80% para el año 2040 (Figura 4), definiendo estrés hídrico como la relación entre las extracciones totales de agua y los recursos hídricos superficiales renovables a nivel de subcuenca (Luo y Colaboradores, 2015). Debido a esto, los países afectados por la escasez de agua deberán conservar y usar eficientemente los recursos hídricos convencionales a su disposición. Aun así, las zonas afectadas tendrán que recurrir a recursos hídricos no convencionales obtenidos mediante la desalación de agua marina, recogida de agua de lluvia (*water harvesting*), uso de aguas regeneradas, reutilización de agua de drenajes agrícolas y desalobración de agua subterráneas (Qadir y Colaboradores, 2007).

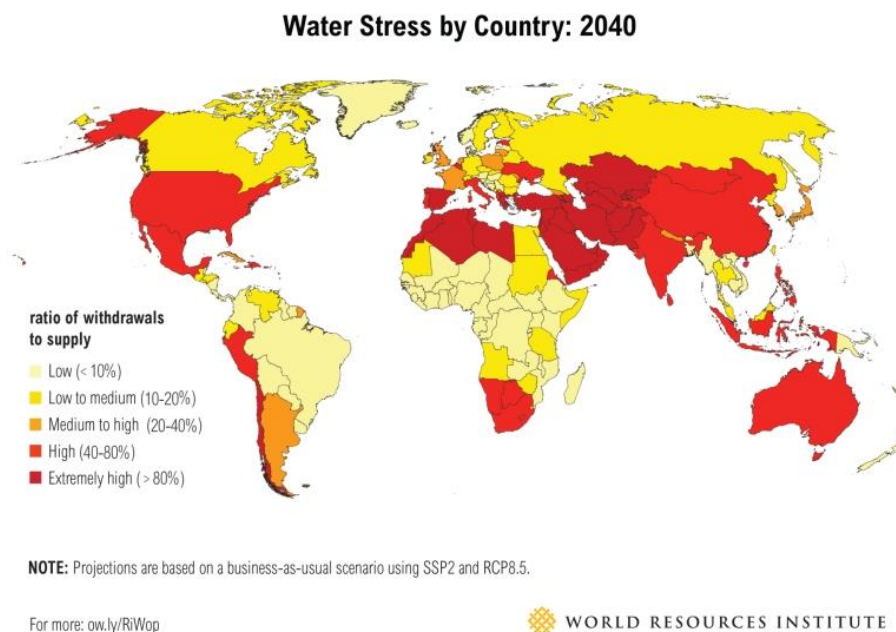


Figura 4. Proyecciones de estrés hídrico por país para el año 2040. Fuente: World Resources Institute.

La Cuenca del Segura, que se sitúa en el sureste de España, tiene un clima predominante mediterráneo, aunque con distintas tipologías dependiendo de la zona (CHS, 2021). La pluviometría media de la cuenca en los últimos 30 años es de 365 mm/año. Hay una alta variabilidad estacional de la pluviometría y en verano son frecuentes los episodios de sequías. Debido al déficit de agua en la cuenca, en 1933 se planteó el Trasvase Tajo-Segura (TTS), en el "Plan Nacional de Obras Hidráulicas" con el objetivo de satisfacer el consumo nacional y de impulsar la economía a través de las exportaciones agrícolas, el cual se puso en marcha en el año 1979 (CHS, 2021). El TTS es la mayor infraestructura hidráulica de España, con una longitud de 300 km, transfiriendo agua a la Cuenca del Segura desde la Cuenca del Alto Tajo, con un caudal de diseño máximo de 1.000 Mm<sup>3</sup>/año. Desde 1980, la sequía en España ha provocado la reducción del volumen almacenado en los embalses del Tajo (Rey y Colaboradores, 2016), lo que ha supuesto grandes variaciones del volumen anual transferido por el trasvase (Figura 5), siendo las transferencias promedio para riego 198 Mm<sup>3</sup> en el periodo entre 1979 y 2009 (Martínez-Granados y Colaboradores, 2011).

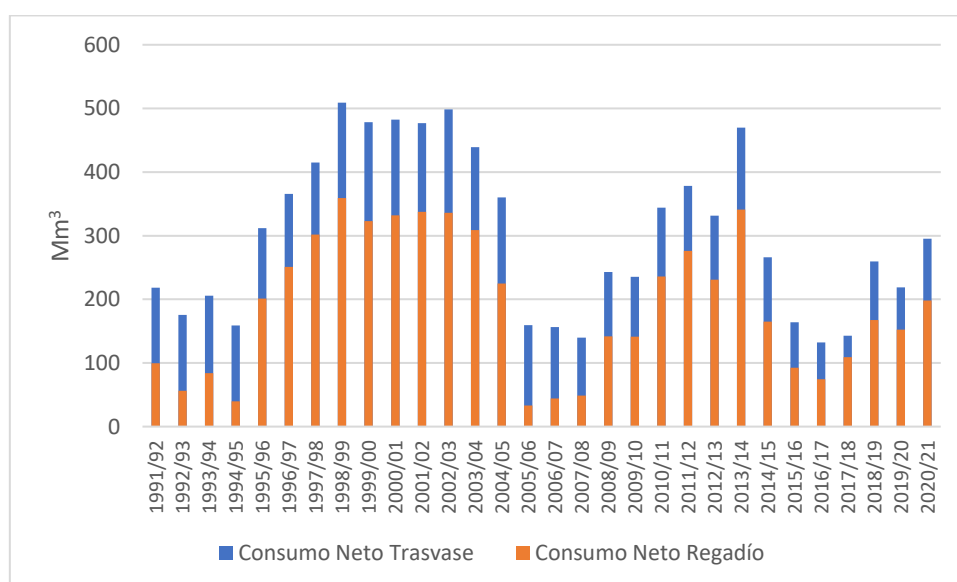


Figura 5. Consumo neto trasvasado y de regadío del trasvase Tajo-Segura en los últimos 30 años.

Fuente: Datos de la Confederación Hidrográfica del Segura.

El TTS permitió una rápida expansión de la agricultura intensiva, convirtiendo la Cuenca del Segura en una de las mayores zonas productoras de hortalizas en Europa (Martínez-Granados y Colaboradores, 2011). Sin embargo, la reducción del caudal trasvasado por el TTS ha hecho necesario el aumento de consumo de recursos hídricos subterráneos (Molina y Colaboradores, 2011) y otros recursos no convencionales. Los recursos hídricos subterráneos renovables suponen en la actualidad una parte importante de los recursos hídricos de la cuenca, según el Plan Hidrológico son 685 Mm<sup>3</sup>/año, teniendo en cuenta la reserva ambiental, los recursos subterráneos disponibles serían de 541 Mm<sup>3</sup>/año (CHS, 2021).

La reutilización de agua residual ha ganado importancia en las últimas décadas en la Región de Murcia (que ocupa la mayoría de la superficie de la Cuenca del Segura), reutilizándose prácticamente el 100% del agua residual (Maestre-Valero y Colaboradores, 2019). El volumen total depurado en el año 2019 por las 99 estaciones de depuración de aguas residuales (EDAR) gestionadas y controladas por la Entidad de Saneamiento y Depuración de la Región de Murcia superó los 109 Mm<sup>3</sup>, del cual 104 Mm<sup>3</sup> fueron utilizados para riego (ESAMUR, 2022).

Dado los recortes de aportes de agua del TTS y que los recursos actuales de aguas superficiales, regeneradas y subterráneas, no pueden satisfacer la demanda, desde el gobierno se ha impulsado la desalinización en los últimos años como una alternativa para aumentar los recursos hídricos de la cuenca. En la actualidad la cuenca cuenta con siete principales Infraestructuras de Desalinización de Agua Marina (IDAM) que suministran agua para la agricultura. La ubicación, capacidad de producción y porcentaje de la producción dedicado a riego se muestran en la Figura 6 y la Tabla 1.



Figura 6. Localización de plantas desaladoras de agua marina que suministran agua para la agricultura en la Cuenca del Segura. Fuente: Adaptado de Martínez-Alvarez y Colaboradores, 2019.

Tabla 1. Principales características de las plantas desaladoras de la Cuenca del Segura en 2017

Planta desaladora	Año de puesta en marcha	Propietario	Inversión (M)	Capacidad total de producción (Mm <sup>3</sup> /año)	Capacidad para riego (Mm <sup>3</sup> /año)	Superficie de riego suministrada (ha)
Mazarrón (Virgen del Milagro)	1995	Comunidad de Regantes de Mazarrón	19	16	16 (100%)	3595
Águilas	2003	Comunidad de Regantes de Águilas	-	8	8 (100%)	5524

<b>La Marina</b>	2006	Comunidad de Regantes La Marina	13	5	4,8 (95%)	1200
<b>Valdelentisco</b>	2008	ACUAMED	128	48	37 (77%)	21.340
<b>Escombreras</b>	2009	Hydro Management SL	117	21	20,5 (98%)	15.352
<b>Águilas-Guadalentín</b>	2013	ACUAMED	203	70	58 (83%)	30.751
<b>Torrevieja</b>	2014	ACUAMED	264	80	40 (50%)	42.319

Fuente: Martínez-Álvarez y Colaboradores, 2019.

### 1.3. Aspectos a considerar en el riego con agua marina desalinizada

#### 1.3.1. Aspectos económicos

Una de las principales limitaciones a la incorporación del AMD en la agricultura es su elevado precio, dado el gran consumo energético requerido para su producción. El proceso de ósmosis inversa requiere entre 2 y 5 kWh/m<sup>3</sup> dependiendo del tamaño de la planta y de los sistemas de recuperación de energía instalados. A parte de la energía requerida en el proceso de desalinización, también se requiere energía para la extracción del agua marina y el proceso de distribución (Figura 6). Para un escenario de consumo de 2,78-3,35 kWh/m<sup>3</sup> en el proceso de desalinización, el consumo total ascendería a 3,49-4,84 kWh/m<sup>3</sup>.

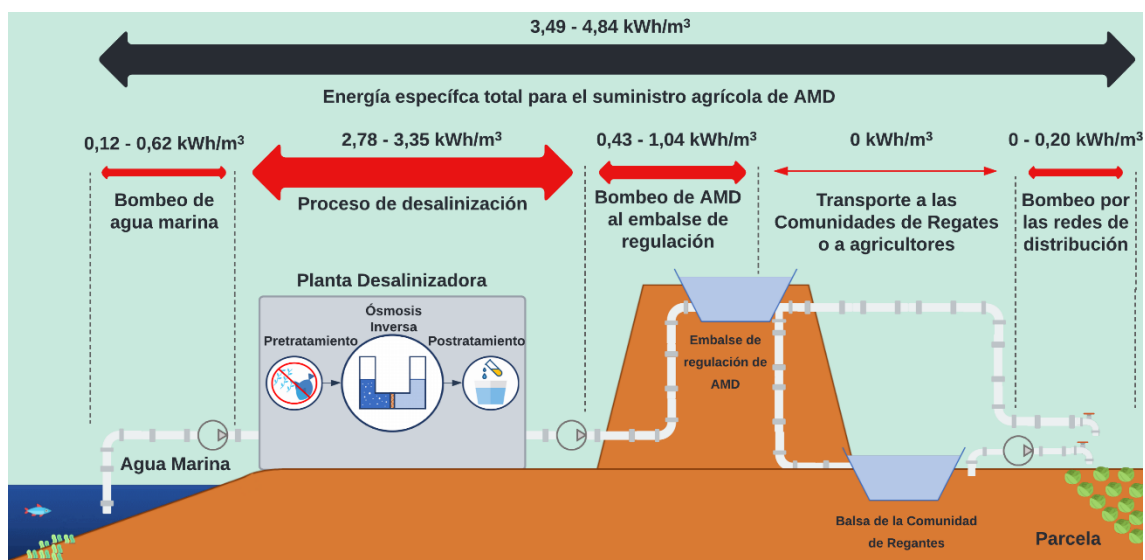


Figura 7. Desglose del consumo de energía (kW/m<sup>3</sup>) para las diferentes etapas de producción y distribución de AMD para riego en el Sureste de España en 2017.

Fuente: Datos aportados por Martínez-Álvarez y Colaboradores, 2019.

A pesar de que la evolución del consumo energético ha sido muy positiva, pasando de 22 kWh/m<sup>3</sup> en 1970 a 3,3 kWh/m<sup>3</sup> en 2003, la reciente y pronunciada subida en el precio de la energía puede conllevar que su coste alcance unos niveles inasumibles por el sector agrícola. Desde el gobierno ha habido iniciativas para impulsar la producción de agua desalinizada, como la fijación de precios en 0,30 €/m<sup>3</sup>, aplicada en la IDAM de Torre Vieja durante el periodo de sequía entre los años 2015 y 2018, cubriendo el resto del coste mediante subsidios (Villar-Navascués y Colaboradores, 2020). En la actualidad existe una gran preocupación de que el coste de agua desalinizada supere 1€/m<sup>3</sup>, por esto se está intentando llegar a un acuerdo entre los regantes y el gobierno, para su subvención en función del coste de la electricidad (La Verdad, 2022). Además del coste energético, otra preocupación desde el punto de vista económico es que dada la carencia de nutrientes esenciales en el AMD como los iones Ca y Mg, los costes de fertirriego pueden incrementarse, como se comenta en el siguiente apartado.

### **1.3.2. Aspectos agronómicos**

Una de las principales ventajas del AMD desde el punto de vista agronómico es su bajo nivel de salinidad, lo que permite mezclarla con otras aguas marginales como las subterráneas y las regeneradas salinas, con el objetivo de reducir su salinidad. Además, la baja salinidad permite reducir los requerimientos de lavado de sales en el riego de cultivos. Sin embargo, el AMD tiene una composición química singular que debe ser considerada para un correcto manejo del riego. Los principales aspectos agronómicos a considerar en el uso de AMD para el riego son: la carencia de nutrientes esenciales como los iones Ca y Mg, la fitotoxicidad de los iones Cl, Na y B, el riesgo de sodificación del suelo y la alcalinidad del agua y su capacidad tampón.

#### ***Bajo contenido de Ca y Mg***

Uno de los principales problemas agronómicos del AMD es su baja concentración de magnesio y el calcio. La deficiencia de estos nutrientes puede provocar graves problemas al desarrollo y rendimiento de los cultivos. Para solventar esta carencia, se puede aumentar su concentración con un adecuado postratamiento en las IDAMs, mediante la mezcla con aguas de elevada concentración de nutrientes, o su incorporando nutrientes al agua de riego mediante fertilización. Sin embargo, esta última solución conlleva un incremento de costes, siendo siempre la más favorable la mezcla con otras aguas (Martínez-Alvarez y Colaboradores, 2020).

#### ***Fitotoxicidad por Boro***

El boro es un nutriente necesario para los cultivos, pero en altas concentraciones puede provocar fitotoxicidad. La concentración de B en el AMD suministrada en la Cuenca del Segura varía entre 0,56 mg/L y 0,92 mg/L (Valero y Colaboradores, 2018). Los cultivos hortícolas presentan umbrales de toxicidad en torno a 1 a 4 mg/L, mientras que en leñosos es alrededor de 0,5 mg/L. Esta diferencia se debe a que la fitotoxicidad es acumulativa, afectando más a cultivos leñosos que a otros cultivos estacionales. Algunos de los síntomas de toxicidad por B son los bordes quemados en las hojas adultas, la

coloración amarillenta de las puntas de las hojas y decaimiento acelerado, pudiendo provocar la muerte de la planta. Debido a esto en muchos casos es necesario recurrir a métodos para reducir la concentración de B en el AMD, como la incorporación de una segunda etapa de ósmosis inversa o uso de resinas selectivas para procesos de intercambio iónico. Los procesos previamente mencionados suponen un aumento en los costes del uso AMD, que hace que la opción más común y económica sea la mezcla con aguas de menor concentración de boro.

### ***Sodificación del suelo***

En torno al 55% y el 31% del contenido de sal de agua marina se debe a los iones Cl y Na, respectivamente, lo que explica su elevada concentración en el AMD. La elevada concentración de Na en el AMD puede presentar un riesgo no solo por su fitotoxicidad, sino por su afectación a las propiedades físicas del suelo. Las AMD producidas por las IDAM de la Cuenca del Segura tienen una RAS (Relación de Adsorción de Sodio) que oscila entre 4 y 5,6 junto con una CE entre 0,46 y 0,54 dS/m, resultando en un riesgo moderado de sodificación (Valero y Colaboradores, 2018). Para evitar la sodificación del suelo, se debe aportar calcio y magnesio al agua para aumentar su baja concentración de cationes divalentes respecto a la de sodio, siendo este otro motivo que justifica la mezcla de agua desalinizada con agua otras aguas con elevada concentración de estos nutrientes.

### ***Acidez y problemas de corrosión***

La alcalinidad depende sobre todo del contenido en carbonatos y bicarbonatos, los cuales son extraídos del AMD por el proceso de ósmosis inversa, obteniendo un agua de baja alcalinidad. La baja alcalinidad del AMD provoca la inestabilidad química del agua, que puede desencadenar el deterioro de las tuberías del sistema de distribución. Para evitar esto son necesarios posts-tratamientos en las IDAM. Tras este proceso, aunque el agua no suponga un riesgo para el sistema de distribución, el nivel de alcalinidad del agua todavía puede no ser suficiente como para garantizar la capacidad tampón necesaria en el agua de riego, que al ser mezclada con diversos fertilizantes puede alterar repentinamente su pH y afectar al rendimiento de los cultivos.

### ***1.3.2. Aspectos medioambientales***

Las principales preocupaciones medioambientales de la desalación son la emisión de gases contaminantes y de efecto invernadero producidos durante la generación de energía, las perturbaciones a los ecosistemas marinos en los procesos de captación de agua, y el vertido de efluentes al mar (salmuera).

Como se señalaba en apartado anterior, las IDAM requieren de una gran cantidad de energía para su operación, además de la requerida para la ósmosis inversa, en las fases de captación, bombeo y distribución, que deriva en una importante emisión de gases contaminantes. Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas a la desalinización de agua marina suelen encontrarse entre 2,3-2,5 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>3</sup>, con un rango de emisiones de 0,08-4,3 kg CO<sub>2</sub>eq/m<sup>3</sup> para un consumo energético entre 4,0-4,5

kWh/m<sup>3</sup> (Cornejo y Colaboradores, 2014). Esta variación puede atribuirse a factores como la localización de la IDAM, los tratamientos utilizados o el método de estimación entre otros.

Para minimizar el efecto sobre la vida marina, los sistemas de toma de agua deben tener una velocidad de toma por debajo de 0,15 m/s (Miller y Colaboradores, 2015) y, además, los sistemas modernos están elevados del suelo marino y tienen aperturas más grandes cubiertas por mallas para reducir la velocidad de toma, lo que mitiga el impacto sobre pequeños organismos como larvas y huevos. También se ha progresado mucho en la minimización de impactos en el vertido de salmueras al mar. Dado que la mayoría de organismos pueden adaptarse a una variación de sus condiciones ambientales óptimas de manera momentánea, los sistemas están optimizados para evitar la continua exposición a condiciones desfavorables. La localización del emisario también es clave y se sitúa en zonas donde no se produzca afección a ecosistemas sensibles.

## 2. JUSTIFICACIÓN Y OBJETIVOS DEL ESTUDIO

En la última década, la desalación de agua de mar para riego se ha implantado masivamente en el sureste de España ante la creciente presión y competencia por los recursos hídricos. El AMD supone un suministro de agua regular sin limitaciones climatológicas e hidrológicas, pero se caracteriza por un coste económico muy superior al del resto de recursos hídricos y también por su impacto medioambiental, asociado en ambos casos a la gran demanda energética de las plantas desalinizadoras. Este proyecto estudia el impacto económico y medioambiental de la sustitución parcial y total de los recursos hídricos convencionales por AMD en dos cultivos representativos de los regadíos de la Cuenca del Segura.

### Objetivos:

- Estimar la viabilidad económica de la sustitución parcial y total de los recursos hídricos convencionales por AMD para el cultivo hortícola mayoritario en la Cuenca del Segura, la lechuga, y uno de los principales cultivos leñosos, el limón.
- Determinar la combinación más factible de recursos hídricos convencionales con AMD para el fertirriego de estos cultivos, atendiendo a las limitaciones de suministro actuales, mediante el uso de herramientas avanzadas de apoyo a la toma de decisión.
- Estimación de la variación de las emisiones de GEI asociada al suministro hídrico para regadío, en función de la cantidad de AMD utilizada para riego y de las expectativas de integración de energías renovables a la producción de electricidad en España.
- Discusión de los resultados obtenidos y propuesta de alternativas para la gestión sostenible de recursos hídricos.



### 3. MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1. Cultivos seleccionados

Para el presente estudio se han elegido el cultivo hortícola mayoritario en la Cuenca del Segura, la lechuga, y uno de los principales cultivos leñosos, el limón (Figura 2).

En 2020 las exportaciones de lechuga superaron las 500.000 toneladas, generando 459 millones de euros (FEPEX, 2020). En este proyecto se va estudiar, en concreto, la variedad Little Gem, cultivada mediante el sistema NFT (Nutrient Film Technique), que es un sistema hidropónico en el cual la solución nutritiva fluye por canales, entrando en contacto directo con el sistema radicular de las plantas. Este sistema permite obtener mayores cosechas, y aumentar la productividad del agua, además de ser una técnica respetuosa con el medio ambiente (Maestre-Valero y Colaboradores, 2018).

El cultivo de cítricos es de gran relevancia en el levante español, en el caso de la Región de Murcia, el limón es el cultivo más común y tradicional de la zona. En 2019 la superficie en producción superó las 23.000 hectáreas, obteniendo una producción de 547.000 toneladas (CARM, 2021). Se ha elegido la variedad Fino, que predomina en la Región de Murcia junto a la variedad Verna, representando conjuntamente más del 98% de la producción de limón. Respecto al sistema de producción, predomina la producción intensiva con fertirrigación mediante riego localizado.

#### 3.2. Escenarios de suministro hídrico

La agricultura es la actividad con mayor consumo de agua en la Cuenca del Segura, la cual conlleva en un gran consumo de energía ligado a la producción y distribución de las distintas fuentes de agua. Las fuentes de agua empleadas para regadío en la Cuenca del Segura son: superficial, subterránea, reutilizada, trasvasada y desalinizada.

Ante las condiciones de sequía de la cuenca y la controversia generada por el TTS, el gobierno nacional ha impulsado una serie de medidas orientadas a sustituir los recursos hídricos que deberían ser aportados por el TTS con AMD. Para este estudio vamos a considerar los siguientes escenarios teóricos, que reflejan la posible transición en las fuentes de suministro de agua para riego:

- Escenario sin sustitución (ES1). Este escenario teórico supone que hay suficientes aportes de agua del TTS y no es necesario utilizar AMD.
- Escenario intermedio (ES2). Este escenario representa la incorporación parcial del agua desalinizada al riego. En este caso, se supone que el agua de riego es la mezcla compuesta por 50% de agua procedente del TTS y 50% de AMD.
- Escenario de sustitución de los aportes del TTS por AMD (ES3). En este escenario se plantea la total sustitución de los aportes del TTS por AMD, atendiendo a una posible situación futura en la que se eliminen las concesiones del TTS.

Finalmente se plantea un escenario denominado “Escenario actual” (EA), que refleja una situación más cercana a la actual, en la que se dispone de distintas fuentes de agua para

riego y la disponibilidad de agua del TTS es limitada. Para las simulaciones se ha supuesto una ilimitada disponibilidad de agua subterránea salobre (ASS) y AMD, mientras que la disponibilidad del agua del TTS queda limitada al 30% del aporte de agua de para riego.

### 3.3. Herramienta de optimización de fertilizantes y costes Irriblend-DSW

En este estudio se ha utilizado la herramienta de apoyo a la toma de decisión Irriblend-DSW, que permite determinar la composición y el coste del fertirriego óptimos (de menor coste) para cada uno de los escenarios planteados. Se trata de un programa en código abierto y programado en Python 3, disponible gratuitamente en el repositorio <https://github.com/irriblend-dsw/irriblend-dsw-v1>. La herramienta tiene cuatro módulos interconectados con funcionalidades específicas (Figura 8).

Irriblend-DSW genera mezclas de agua considerando las limitaciones de disponibilidad indicadas por el usuario. Una vez obtenida cada mezcla de agua para cada uno de los escenarios de disponibilidad hídrica definidos, con su correspondiente una cantidad de nutrientes y conductividad eléctrica (CE), el módulo de optimización de fertirrigación calcula los nutrientes que se deben añadir a la mezcla de agua para conseguir cubrir las necesidades nutricionales del cultivo al mínimo coste. Para ello, el programa escoge la combinación de fertilizantes disponibles (indicados por el usuario) que pueda realizar los aportes nutricionales necesarios minimizado su coste. La función de optimización de este módulo tiene en cuenta las siguientes restricciones:

- $CE < \text{Límite de CE}$ .
- Cantidad de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{K}^+$  exacta para cubrir las necesidades nutricionales.
- Cantidad de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{Na}^+$  igual o superior a las necesidades nutricionales.

Los resultados que ofrece la herramienta son:

- Las combinaciones de agua factibles que permiten cumplir con las necesidades nutritivas, considerando el aporte de los fertilizantes comerciales y las restricciones señaladas.
- La combinación óptima de fertilizantes y las características de la solución final de fertirrigación.
- Los indicadores de productividad y rentabilidad para cada mezcla de agua. El indicador potencial de rentabilidad (PPI) es el beneficio de la cosecha (producción [kg] x precio de mercado [€/kg]) menos el coste de fertirrigación (agua + fertilizantes).

Para poder ofrecer estos resultados, Irriblend-DSW necesita disponer de los siguientes datos de entrada:

- Solución deseada de fertirriego.
- Límite de CE en dS/m para la simulación.
- Fuentes de agua: composición (mg/l), precio (€/m<sup>3</sup>) y disponibilidad (%). Un porcentaje de 100% significa que no hay ninguna restricción de disponibilidad de esa fuente de agua.
- Fertilizantes comerciales: composición (mmol/g) y precio (€/kg).
- Información del cultivo: índices de productividad y rentabilidad potenciales (sin limitaciones de agua o nutrientes y sin estrés climático o fitosanitario):
  - Productividad del agua (kg cosecha/m<sup>3</sup> agua de riego).
  - Productividad de la tierra (kg cosecha/m<sup>2</sup> de superficie cultivada).
  - Precio de mercado del cultivo (€/kg).
  - El umbral de salinidad del cultivo (“a”, dS/m) por encima del cual hay pérdida del rendimiento del cultivo; y el factor de reducción (“b”) basados en la fórmula de la FAO 61 (FAO, 2002): Porcentaje de cosecha =  $100 - b(CE_r - a)$ , donde CE<sub>r</sub> es la CE en la zona radicular.

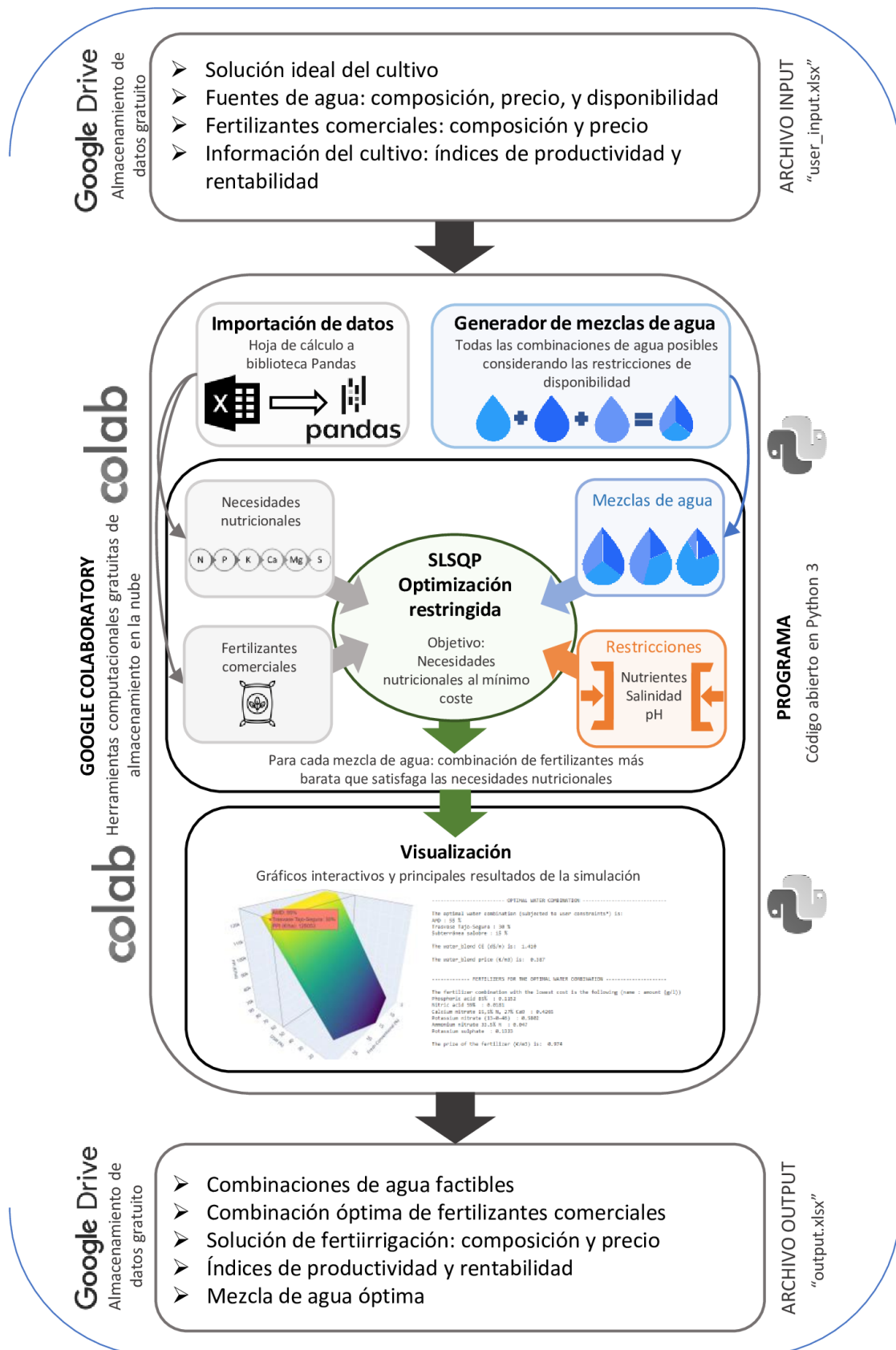


Figura 8. Esquema y diagrama de flujo de Irriblend-DSW.  
 Fuente: Adaptado de Gallego-Elvira y Colaboradores, 2021.

### 3.4. Datos de entrada para simulaciones con Irriblend-DSW

#### *Necesidades de agua y nutrientes*

Las necesidades de riego y de nutrientes para cada uno de los cultivos en estudio se resumen en las Tablas 2 y 3.

Tabla 2. Necesidades nutricionales de la lechuga.

Cultivo	Solución nutritiva (mmol/l)								Riego (m <sup>3</sup> /ha año)
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	
Lechuga	11	1	2,5	0,5	1	7,4	4,4	1,2	6.750

Fuente: Maestre-Valero y Colaboradores, 2018.

Tabla 3. Necesidades nutricionales del limón.

Cultivo	Fertilización (kg/ha)					Riego (m <sup>3</sup> /ha año)
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	
Limón	190	64	137	17	10	6.378

Fuente: García García, 2014.

#### *Recursos hídricos*

Para las simulaciones se han utilizado datos de agua desalinizada de la IDAM de Escombreras, que tiene unas características similares a las demás aguas desalinizadas de la zona, agua procedente del TTS y agua subterránea (con alto nivel de salinidad y contenido de nutrientes) disponible para riego en la Cuenca del Segura.

Tabla 4. Fuentes de agua.

	Tipo	Superficial	Desalinizada	Subterránea
	Origen	TTS	IDAM Escombreras	Cuenca del Segura
Precio	€/m <sup>3</sup>	0,16	0,6	0,06
Conductividad	dS/m	0,9	0,5	5,7
Ca <sup>2+</sup>	mg/L	97,0	20,0	381,4
Mg <sup>2+</sup>	mg/L	40,0	2,4	265,8
Na <sup>+</sup>	mg/L	41,0	88,0	831,0
K <sup>+</sup>	mg/L	2,2	4,0	16,6
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	mg/L	0,2	0,0	1,7
Cl <sup>-</sup>	mg/L	59,0	140,0	1352,0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	mg/L	233,0	4,0	1432,4
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	180,0	68,2	68,2
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	mg/L	1,7	0,1	60,6
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> /PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	mg/L	0,1	0,1	0,3

Fuente: Datos facilitados la IDAM Escombreras y la Comunidad de regantes de Campo de Cartagena.

#### *Umbral de salinidad de los cultivos*

La tabla 5 presenta los umbrales de salinidad y el factor de reducción de producción para los cultivos en estudio, para la estimación de las pérdidas de cosecha por salinidad con la fórmula de la FAO 61 (FAO, 2002).

Tabla 5. Umbral de salinidad del cultivo y factor de reducción del rendimiento del cultivo.

Cultivo	Umbral de salinidad "a" (dS/m)	Factor de reducción "b" (%)	Fuente
Lechuga	3	13	Gallego-Elvira y Colaboradores, 2021
Limón	2,1	13,7	Cerda y Colaboradores, 1990

### Abonos comerciales disponibles

Para la simulación se han utilizado abonos disponibles en el área de estudio. La Tabla 6 muestra los datos medios de los distribuidores de la zona.

Tabla 6. Composición (mmol/g) y precio de los fertilizantes comerciales utilizados.

	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	H <sup>+</sup>	Precio (€/kg)	d (g/cm <sup>3</sup> )
Ácido fosfórico 85%	0	0	8,67	0	0	0	0	0	0	8,67	0,58	1,69
Ácido nítrico 59%	9,36	0	0	0	0	0	0	0	0	9,36	0,43	1,36
Nitrato de calcio 15,5% N, 27% CaO	10,18	0,92	0	0	4,62	0	0	0	0	0	0,46	1,05
Nitrato potásico (13-0-46)	9,90	0	0	9,90	0	0	0	0	0	0	1,03	1,1
Nitrato amónico 33.5% N	12,5	12,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0,34	1
Sulfato de amonio 21% N, 58,8% S03	0	15,15	0	0	0	0	7,57	0	0	0	0,23	0,95
Sulfato de potasio	0	0	0	11,47	0	0	5,73	0	0	0	0,68	1
Sulfato de magnesio (16%MgO, 31,7%SO3)	0	0	0	0	0	4,06	4,06	0	0	0	0,32	1
Fosfato monoamónico (12-61-0)	0	8,69	8,69	0	0	0	0	0	0	0	1,03	1
Fosfato monopotásico (0-51-34)	0	0	7,34	7,34	0	0	0	0	0	0	1,38	1
Nitrato de magnesio 11%N, 15,7% MgO	7,80	0	0	0	0	3,90	0	0	0	0	0,58	0,85
Cloruro de calcio dihidratado	0	0	0	0	6,80	0	0	13,61	0	0	0,2	1

Fuente: Datos facilitados por proveedores locales.

### ***Índices de productividad y rentabilidad***

El sistema de cultivo NFT presenta unos elevados costes de inversión, sin embargo, posee ciertas ventajas frente al cultivo en suelo ya que permite una producción intensiva de hasta nueve ciclos por año. También permite un mejor manejo de la solución nutritiva, consiguiendo una alta productividad del agua y una mejora del uso de fertilizantes, además de aumentar la cosecha (Brechner y Both 2014). Los costes de inversión en el cultivo intensivo del limón son mucho menores, pero se ha de tener en cuenta que, al ser un cultivo en suelo de exigente demanda hídrica, la productividad del agua y de la tierra será reducida (Tabla 7).

Tabla 7. Índices de productividad y rentabilidad de los cultivos

<b>Cultivo</b>	<b>Productividad del agua (kg/m<sup>3</sup>).</b>	<b>Productividad de la tierra (kg/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Fuente</b>
<b>Lechuga</b>	36,4	23,6	Maestre-Valero y Colaboradores, 2018
<b>Limón</b>	7,5	4,8	García-García, 2014

### ***Precios de mercado***

La globalización del mercado agroalimentario ha aumentado la competencia comercial con terceros países, provocando que los precios percibidos por los agricultores presenten una elevada variabilidad interanual. Para realizar las simulaciones se han tomado los precios registrados en los Informes de Estadística Agraria de la Región de Murcia 2010-2019 (CARM, 2019). Para cada cultivo se consideró el precio máximo, mínimo y medio para ese periodo de tiempo con el fin de realizar un análisis de sensibilidad al precio.

Tabla 8. Precio mínimo, medio, y máximo percibidos por los agricultores en los últimos 10 años.

<b>Cultivo</b>	<b>Precio de mercado 2010-2019 (€/kg)</b>		
	<b>Mínimo</b>	<b>Medio</b>	<b>Máximo</b>
<b>Lechuga</b>	0,25	0,58	1,31
<b>Limón</b>	0,09	0,28	0,65

Fuente: Datos de la CARM.

### ***Estimación del umbral de rentabilidad***

Como se señalaba en el apartado 3.3, Irriblend-DSW calcula el indicador potencial de rentabilidad (PPI) para cada escenario de suministro hídrico, a partir de los datos de producción, el precio de mercado y el coste de fertiirrigación. El PPI se calcula como los ingresos de la cosecha menos el coste de fertiirrigación; y el umbral de rentabilidad (UR) como los costes anuales totales de explotación (costes de inversión y operacionales) menos los costes de fertiirrigación. Por tanto, el UR indica a partir de que valor de PPI se empieza a obtener beneficio.

Tabla 9. Datos económicos (costes de inversión, costes operacionales, umbral de rentabilidad) de los cultivos seleccionados. Todos los datos expresados en €/ha año.

	Cultivo	
	Lechuga NFT <sup>a</sup>	Limón <sup>b</sup>
<b>Coste de inversión</b>	19.483	512
<b>Costes operacionales</b>	92.844	7.018
Materiales	33.764	3.739
Agua de riego	1.080	960
Electricidad	3.279	199
Combustible	132	93
Abonos	8.051	1.278
Fitosanitarios	1.917	319
Plántulas	19.305	-
Otros	-	887
Mano de obra	55.296	1.583
Maquinaria	2.784	698
Renta de la tierra	1.000	1.000
<b>Costes fertiirrigación (CF)</b>	9.131	2.238
<b>Costes totales (CT)</b>	112.327	7.530
<b>Umbral de rentabilidad (CT-CF)</b>	103.196	5.292

Fuente: <sup>a</sup> Maestre-Valero y Colaboradores, 2018; <sup>b</sup> García-García, 2014.

### 3.5. Cálculo de emisiones

Para determinar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) totales producidos por una determinada actividad agrícola, hay que tener en cuenta distintas fuentes de emisión, entre las que se incluyen las producidas del uso directo de electricidad y combustibles fósiles para riego y labores de campo, las derivadas a la producción y mantenimiento maquinaria y equipamiento de riego o las debidas a la producción, transporte, almacenamiento y transferencia de agroquímicos, entre otros. La huella de carbono se expresa en equivalentes de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>eq) de los GEI, calculados mediante factores de conversión que indican la cantidad de equivalentes producidos por unidad de las distintas fuentes de emisión.

En este estudio, se han analizado los incrementos de emisiones derivados del incremento de energía que conlleva la integración de AMD en los diferentes escenarios de suministro hídrico. En Martin-Gorrioz y Colaboradores (2021) se muestra el consumo energético debido al suministro de agua de riego en los tres escenarios considerados, en los que se plantea la sustitución parcial y total del agua del TTS por AMD. A partir de los datos de consumo energético de estos autores, se han considerado los siguientes consumos de energía para los escenarios teóricos planteados en el apartado 3.2: E1: 0,9 kWh/m<sup>3</sup>; ES2: 1,85 kWh/m<sup>3</sup>; ES3: 2,8 kWh/m<sup>3</sup>. Es importante señalar que la procedencia de la energía utilizada condiciona la cantidad de emisiones, ya que la electricidad empleada puede provenir de combustibles fósiles o de fuentes renovables. En concreto, cabe destacar que, en los últimos años las emisiones de GEI asociadas a la generación



de energía en España se han reducido sustancialmente, pasando de 0,31 a 0,14 tCO<sub>2</sub>eq/MWh en el periodo 2012-2021. Esto es debido a la reducción de las fuentes contaminantes en el mix energético, que se redujeron hasta representar el 32% en el año 2021 (Figura 9). Para el cálculo de emisiones de GEI, expresados en equivalentes de CO<sub>2</sub>, se han utilizado los factores de emisión (tCO<sub>2</sub>eq/MWh) de la Red Eléctrica de España (REE), que se presentan en la Figura 9.

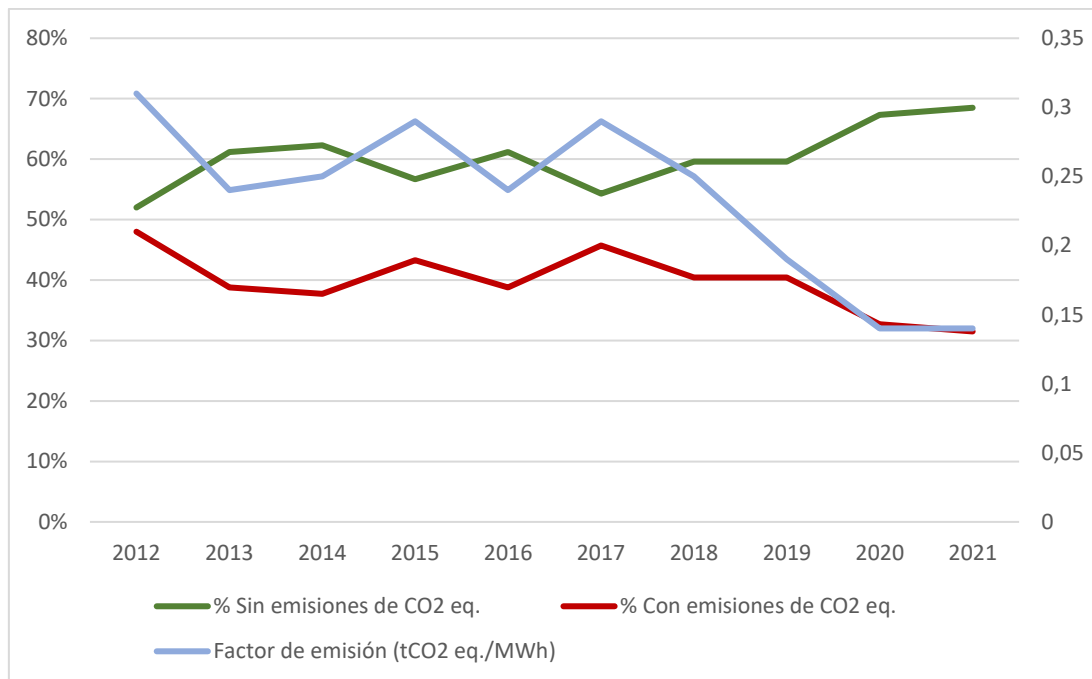


Figura 9. Estructura de la generación con/sin emisiones CO<sub>2</sub>eq. (%) y factor de emisión de CO<sub>2</sub>eq. asociado a la generación de energía eléctrica nacional para el periodo 2012-2021.

Fuente: Datos de REE (Red Eléctrica de España).

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. Análisis de costes de agua y fertilizantes para los escenarios teóricos de suministro hídrico

La Figura 10 muestra el indicador PPI y los potenciales beneficios para los cultivos seleccionados en los escenarios teóricos de disponibilidad de recursos hídricos.



Figura 10. PPI, beneficio potencial y umbral de rentabilidad de ambos cultivos para los escenarios de suministro hídrico ES1, ES2 y ES3 y precios de venta mínimo, medio y máximo. UR: Umbral de rentabilidad.

En el ES1 el cultivo de la lechuga NFT presenta un PPI de 129.448 €/ha para el precio medio de la lechuga, y teniendo en cuenta que el UR es de 103.196 €/ha, se esperan unos beneficios de 26.252 €/ha. Para el precio mínimo se ha obtenido un PPI de 51.568 €/ha, lo que supone pérdidas de 51.628 €/ha, mientras que un precio máximo resultaría en unas ganancias de 198.532 €/ha, con un PPI de 301.728 €/ha. La sustitución parcial/total para un precio medio implica una caída de un 6%/13% en el beneficio en los escenarios ES2/ES3. Debido a los elevados costes de inversión, una caída significativa en el precio de mercado, como la caída de precio hasta 0,31 €/kg observada en mayo y septiembre de 2014 puede suponer también pérdidas superiores a 50.000 €/ha en todos los escenarios, llegando hasta 55.088 €/ha en el ES3. Para un precio de venta medio se supera el umbral de beneficio en todos los escenarios. Dado el precio máximo de 1,31€/kg, registrado en abril de 2010, se obtendría el máximo beneficio de 198.532 €/ha en el ES1. Estos resultados ponen de manifiesto que el cultivo de lechuga NFT puede tener una notoria rentabilidad en todos los escenarios de suministro supuestos.

En el caso del cultivo de limón, se trabaja con un modesto umbral de beneficio de 5.292 €/ha, por lo que oscilaciones en el precio de mercado y costes del agua tiene un gran impacto económico. En el ES1 se obtiene un PPI de 2.415/10.228/29.295 €/ha en los escenarios ES1/ES2/ES3, obteniendo beneficios (6.243 €/ha) solo a partir de un precio medio. Las pérdidas ascienden a 2.877 €/ha para el precio mínimo, mientras que el inusual precio máximo percibido en marzo de 2016 de 0,65 €/kg supondría unas ganancias de 24.003 €/ha para el ES1. Debido a los estrechos márgenes de beneficio, se pone de manifiesto que la sustitución parcial/total para precios bajos no es viable y para un precio medio implica una gran caída beneficio de un 21%/53% para ES2/ES3.

Por tanto, aunque el cultivo del limón supone unos costes de inversión mucho menores, de 512 €/ha frente a los 19.483 €/ha de la lechuga, presenta un beneficio mucho menor, siendo el más favorable 6.243 €/ha frente a los 26.252 €/ha de la lechuga a un precio medio. También presenta un alto riesgo ante posibles cambios de disponibilidad hídrica. No obstante, es importante destacar que, ante una caída de los precios de mercado, el cultivo de lechuga NFT presenta un mayor riesgo, ya que conllevaría unas pérdidas mucho mayores. Sin embargo, para el caso del limón, las pérdidas obtenidas en un año al precio mínimo, podrían recuperarse al año siguiente con un precio medio, a excepción del ES3, el que se requerirían 2 años. La lechuga necesitaría de 2 a 3 años a un precio medio para recuperar las pérdidas de un año al precio mínimo, en función del escenario.

Para los cultivos como el limón, con estrechos umbrales de beneficio, el aumento de costes de producción que supone la incorporación de AMD, amenaza seriamente la rentabilidad del cultivo, ya que una ligera disminución del precio percibido puede suponer pérdidas. Aunque para cultivos de alta rentabilidad como la lechuga supondría también un aumento de los costes de producción, estos no son significativos ya que con un margen de beneficio mucho mayor aún se mantendría considerablemente por encima del umbral de rentabilidad. En ambos cultivos las posibles pérdidas puntuales son fácilmente recuperables suponiendo un precio medio, sin embargo, el beneficio del limón es mucho más reducido lo que hace que sea mucho más sensible a la incorporación del AMD.

#### 4.2. Optimización del fertirriego para escenario actual

La herramienta Irriblend-DSW permite obtener la mezcla de aguas óptima para maximizar el beneficio ante una serie de restricciones. En el caso del escenario actual, se consideró la mezcla de agua salobre (bajo coste y alta salinidad), AMD y agua del TTS, limitanda a un máximo del 30% la cantidad de agua del TTS en la mezcla.

Tabla 10. Combinación de agua, abonos seleccionados, solución nutritiva e indicadores de rentabilidad para la mezcla de agua óptima calculada por Irriblend-DSW para los cultivos de lechuga NFT y limón.

<b>Mezcla de agua óptima</b>				
	<b>Lechuga NFT</b>		<b>Limón</b>	
<b>Combinación de agua</b>				
Precio	0,39 €/m <sup>3</sup>		0,36 €/m <sup>3</sup>	
Conductividad	1,41 dS/m		1,67 dS/m	
Fuente	Cantidad (%)	Disponibilidad (%)	Cantidad (%)	Disponibilidad (%)
Trasvase	30	Hasta 30	30	Hasta 30
Desalinizada	55	Hasta 100	50	Hasta 100
Subterránea	15	Hasta 100	20	Hasta 100
<b>Abonado</b>				
Coste:	0,98 €/m <sup>3</sup>		0,11 €/m <sup>3</sup>	
Abono	Dosis (g/l)		Dosis (g/l)	
Ácido fosfórico 85%	0,1152		0,0229	
Ácido nítrico 59%	0,0181		0,0768	
Nitrato de calcio	0,4265		0,0271	
Nitrato potásico	0,5802		0,0351	
Nitrato amónico	0,047		0,0362	
Sulfato de potasio	0,1323		0	
<b>Solución nutritiva</b>				
Precio	1,36 €/m <sup>3</sup>		0,47 €/m <sup>3</sup>	
Conductividad	2,78 dS/m		1,97 dS/m	
Ión	Concentración (mmol/l)		Concentración (mmol/l)	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	11		2	
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	1		0,2	
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	3,7		3,7	
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,5		0,8	
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	1		0,5	
K <sup>+</sup>	7,4		0,5	
Ca <sup>2+</sup>	4,4		3	
Mg <sup>2+</sup>	2,2		2,7	
<b>Costes e indicador potencial de rentabilidad (PPI)</b>				
Coste fertirriego (€/kg)	0,037		0,063	
PPI (€/ha)	128.053		10.450	
Productividad del agua (kg/m <sup>3</sup> )	36,4		7,5	

#### 4.2.1. Lechuga

##### **Solución óptima**

Planteando el escenario de suministro actual (ES0), a partir de los inputs aportados con las características del cultivo, las aguas, los fertilizantes, y las restricciones impuestas (límite salinidad, nutrientes, pH) mencionadas anteriormente, la mezcla óptima calculada por el programa consiste en un 30% agua del TTS (máximo permitido), 55% AMD, y 15% ASS (Figura 11). La mezcla de agua presenta una EC de 1,41 dS/m y un coste de 0,39 €/m<sup>3</sup>. En la Tabla 10 se muestra la combinación óptima de fertilizantes y la solución final de fertiirrigación que prácticamente llega al umbral de salinidad (3 dS/m) con una CE de 2,78 dS/m, lo que permite ahorrar en el abonado al añadir el máximo de nutrientes posible con agua salobre de pozo sin afectar a la productividad. El coste de la solución de fertiirrigación es de 1,36 €/m<sup>3</sup>, lo que supone un coste de fertiirrigación de 0,037 € por kg de lechuga. Para un precio de mercado de 0,58 €/kg, el PPI para la mezcla óptima alcanza la cifra de 128.053 €/ha, lo que supondría un beneficio de 24.857 €/ha, poniendo de manifiesto la elevada rentabilidad de este cultivo.

##### **Soluciones factibles y rentables**

El programa simula todas las mezclas posibles entre las aguas indicadas teniendo en cuenta su disponibilidad y variando su cantidad en tramos de 5%, lo que da lugar a 93 combinaciones de agua, de las cuales 90 son factibles (cubren las necesidades del cultivo con los fertilizantes disponibles bajo las condiciones impuestas). De estas, 48 serían viables económicamente ya que superan el umbral de rentabilidad (103.196 €/ha) teniendo en cuenta el precio de venta medio de 0,58 €/kg. Cabe señalar que en todas las soluciones viables hay un máximo de 40% de agua salobre, dada su alta salinidad.

##### **Abonado**

En la mezcla óptima (55% AMD; 30% TTS; 15% ASS), al tratarse de un cultivo hidropónico y ser la fertiirrigación única fuente de nutrientes del cultivo, el coste de abonado (0,98 €/m<sup>3</sup>) supone la mayoría del coste de la solución nutritiva (1,36 €/m<sup>3</sup>).

Según las simulaciones un aumento de un 5% de agua salobre de pozo reduce el coste de la solución de fertiirrigación en 0,03 €/m<sup>3</sup> aproximadamente. Esta diferencia se debe a la cantidad de agua subterránea salobre que contienen las mezclas, ya que su elevado contenido de nutrientes permite obtener la solución ideal del cultivo con un menor uso de fertilizantes, economizando en la fertiirrigación. La cantidad de agua salobre y el coste de la solución nutritiva tienen un coeficiente de correlación de -0,95 indicando la estrecha relación que tienen ambos parámetros y como el descenso del agua subterránea salobre implica una subida del coste de la solución de riego.

Los abonos seleccionados para la mayoría de mezclas son ácido fosfórico y nítrico, nitrato de calcio, potásico y amónico además de sulfato de potasio. Para mezclas con más de 25% de ASS no es necesaria la adición de sulfato de potasio en el abonado y

mezclas de agua con alto contenido de AMD que tengan menos de un 10% de ASS necesitan nitrato de magnesio.

### ***Aspectos destacables***

Como se observa en la figura 11 el PPI va cayendo de forma lineal conforme alcanza una cantidad límite de agua subterránea salobre, este límite representa el umbral de salinidad del cultivo de 3 dS/m a partir del cual se reduce la productividad del cultivo un 13% por cada dS/m. Una vez alcanzado el umbral de salinidad, cada aumento de un 5% de ASS reduce la productividad en 1,5 kg/m<sup>3</sup>, reduciendo el PPI en 5.454 €/ha. La mezcla de agua con contenidos del 30% AMD, 30% agua del TTS y 40% ASS, supera el umbral de rentabilidad (PPI: 107.164 €/ha), pero debido la elevada cantidad de agua de pozo la solución de riego tiene una conductividad de 4,23 dS/m que consecuentemente reduce la productividad un 16%.

Para el escenario de suministro planteado, las simulaciones indican que la mezcla óptima para un precio de 0,48 €/kg resultaría en un PPI de 104.453 €/ha, que se encuentra al límite del umbral de beneficio de 103.196 €/ha, por lo que un precio de venta inferior resultaría en pérdidas. Aunque en todos los años del intervalo 2010-2019 el precio de venta medio fue considerablemente superior a esta cifra, se observaron cifras mensuales inferiores. Por esto, es aconsejable distribuir la cosecha a lo largo del año, compensando la variabilidad de los precios de mercado.

Los resultados ponen de manifiesto que la inclusión de agua subterránea juega un papel decisivo a la hora de mitigar los efectos negativos de la incorporación de AMD. La adición de ASS con alto contenido en nutrientes a la mezcla de aguas es beneficiosa mientras no suponga un aumento excesivo de la salinidad, ya que permite ahorrar reduciendo el uso de fertilizantes, compensando así la falta de nutrientes del AMD. Por ejemplo, observamos que el coste de fertiirrigación obtenido en el ES3 (uso único de AMD) fue de 0,046 €/kg, mientras que para la situación actual (inclusión de ASS en la mezcla) fue de 0,037 €/kg. Además, hay que destacar que el coste del agua subterránea es muy inferior al del AMD.

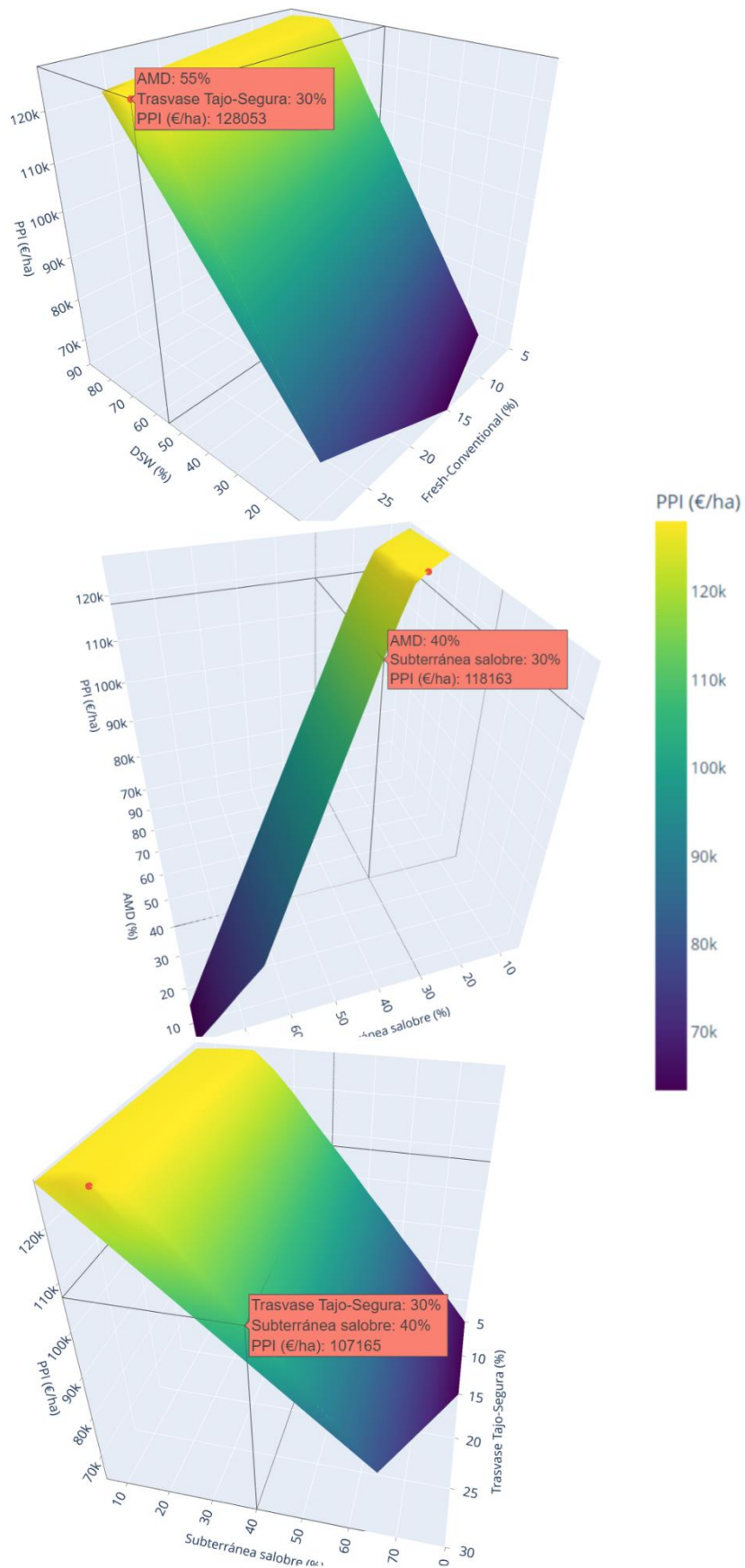


Figura 11. Gráfico 3D que relaciona el PPI y los porcentajes utilizados en la mezcla de aguas para el cultivo de lechuga NFT.

#### 4.2.2. Limón

##### **Solución óptima**

La mezcla de aguas óptima calculada para limón en el escenario actual, dadas las restricciones impuestas al programa mencionadas anteriormente, está compuesta por 30% agua del TTS, 50% AMD y 20% agua ASS. La mezcla presenta una CE de 1,67 dS/m a un coste de 0,36 €/m<sup>3</sup>, dónde la incorporación de aguas más económicas como la del trasvase y el agua subterránea, reducen en 0,24 €/m<sup>3</sup> el precio del uso de 100% AMD. En la Tabla 10 se muestra la combinación óptima de fertilizantes y la solución final de fertirrigación que presenta una conductividad de 1,97 dS/m, próxima al umbral de salinidad de 2,1 dS/m, que utiliza la máxima cantidad de agua subterránea sin reducir la productividad. El coste de la solución de fertirrigación es de 0,47 €/m<sup>3</sup>, del cual 0,11€/m<sup>3</sup> corresponden al abonado, lo que supone un coste de fertirrigación de 0,063 € por kg de limón producido. El coste del abonado es mucho menor que en caso de la lechuga, ya que se trata de cultivo en suelo, el cual aporta nutrientes, además de los incorporados mediante el 20% de ASS con alto contenido de nutrientes. El PPI de la mezcla óptima alcanza la cifra de 10.450 €/ha para un precio de mercado medio de 0,28 €/kg lo que proporcionaría un beneficio de 5.157 €/ha, considerado el umbral de rentabilidad de 5.292 €/ha.

##### **Soluciones factibles y rentables**

En la simulación para todas las 93 combinaciones posibles, 90 superan el umbral de rentabilidad (5.292 €/ha). Esto se explica como consecuencia de la menor cantidad de nutrientes a aportar en la solución de riego al encontrarnos en un cultivo tradicional y contar con los nutrientes provenientes del suelo. Las 3 combinaciones que no llegan al umbral de rentabilidad cuentan con una de productividad inferior a 3,5 kg/m<sup>3</sup> (menos del 50% respecto a plena productividad), ya que contienen más de 80% de agua subterránea salobre en la mezcla, lo que incrementa la salinidad hasta los 5 dS/m, valor no aceptable para este cultivo, ya que dañarían severamente la productividad (Figura 12).

##### **Abonado**

Las simulaciones estiman que un aumento de un 5% de agua salobre de pozo reduce el coste de la solución de fertirrigación en 0,03 €/m<sup>3</sup> aproximadamente. Esta diferencia se debe a la cantidad de agua subterránea salobre que contienen las mezclas, ya que su elevado contenido de nutrientes permite obtener la solución ideal del cultivo con un menor uso de fertilizantes, reduciendo los costes de fertirrigación. Los abonos seleccionados para la mayoría de mezclas son ácido fosfórico y nítrico, y nitrato de calcio, potásico y amónico. Las mezclas con menos de 10% de agua subterránea salobre pueden necesitar la adición de otros abonos como sulfato de amonio, potasio, y magnesio, para compensar las carencias del AMD.



**Aspectos destacables**

De todas las mezclas simuladas, la la solución de riego óptima presenta una salinidad (1,97dS/m,) justo por debajo del umbral de reducción de rendimiento por salinidad (2,1 dS/m), por lo que la productividad es máxima 7,5 kg/m<sup>3</sup>. En algunos cultivos con altos costes de abonado es factible superar ligeramente el umbral de rentabilidad con tal de añadir más ASS que permita disminuir el coste de la solución nutritiva. Sin embargo, en el cultivo del limón tradicional las necesidades de abonado en el fertirriego no son tal elevadas debido a los aportes del suelo. En la Figura 12 podemos observar cómo al aumentar el agua salobre, el PPI se reduce de forma lineal a un ritmo aproximado de 400 €/ha. La mezcla más próxima al umbral de rentabilidad (15% AMD; 5%TTS; 80% ASS) con un PPI de 5.338 €/ha aportaría unos beneficios de 46 €/ha.

La mezcla óptima, como en el caso de la lechuga, cuenta en el máximo de agua del TTS disponible, ya que se trata de un agua de alta calidad con precio moderado. En la selección de aguas para la mezcla, el agua subterránea es la más barata con un precio de 0,06 €/m<sup>3</sup>, y además aporta nutrientes que reducen el coste del abonado. Sin embargo, su uso debe limitarse en el momento en el que conlleve un aumento de la salinidad por encima del umbral de salinidad. Para el escenario de suministro planteado las simulaciones indican la mezcla óptima para un precio de 0,18 €/kg, que resultaría en un PPI de 5.650 €/ha y, teniendo en cuenta que el umbral de beneficio es 5.292 €/ha, un precio de venta inferior supondría pérdidas. En los años 2010, 2011 y 2014 se registraron precios de venta inferiores a esta cantidad.

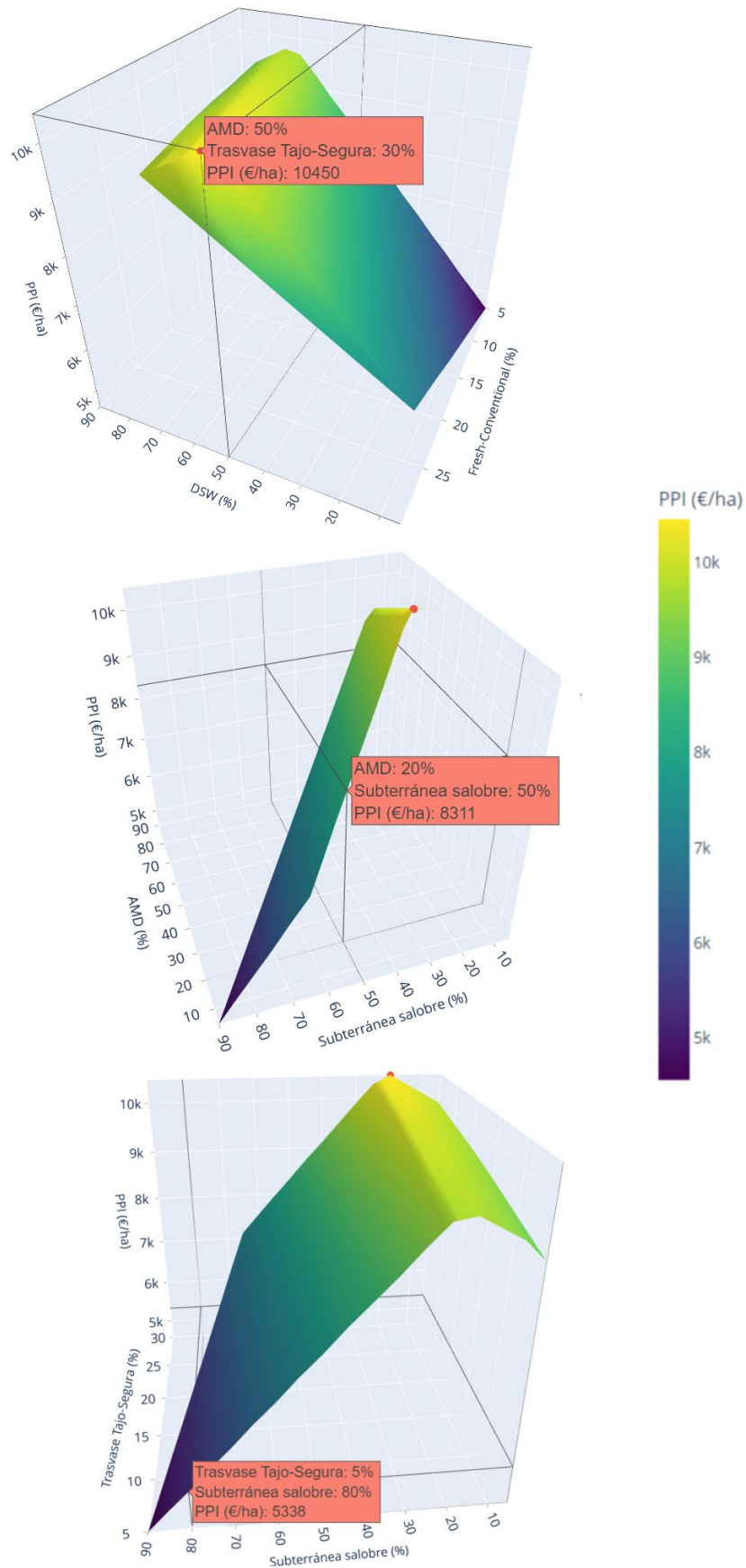


Figura 12. Gráfico 3D que relaciona el PPI y los porcentajes utilizados en la mezcla de aguas para el cultivo de limón.

### 4.3. Análisis de reducción de suministro del trasvase

Como se ha comentado en el apartado 1.2, el suministro de agua del TTS para riego presenta cierta variabilidad y una tendencia negativa en los últimos años. Al ser la fuente de agua disponible en la zona con una mejor relación calidad/precio, su posible reducción afectaría directamente a la rentabilidad de los cultivos. Herramientas de simulación, como Irrblend-DSW, permiten estudiar las implicaciones de su reducción. En este caso se ha estudiado la reducción desde el 30% actual, planteado en el apartado anterior, hasta un 0%, en pasos del 5%, tomando como precio de venta de los cultivos el precio medio de los últimos 10 años.

#### 4.3.1. Lechuga

En todas las simulaciones realizadas la mezcla óptima utiliza toda el agua del TTS disponible. En el intervalo de disponibilidad 0-20% agua del TTS la mezcla óptima está compuesta por 20% de agua salobre de pozo, reduciéndose hasta 15% con una disponibilidad de 25% y 30% de TTS, mientras que el porcentaje restante se completa con AMD. La Figura 13 muestra la evolución del PPI y el beneficio conforme se reduce la disponibilidad de agua del TTS. Al reducirse el suministro del TTS también lo hacen PPI y beneficio, principalmente cuando la disponibilidad se reduce del 15 and 5%.

La conductividad eléctrica de la solución de fertirrigación alcanza 3,01 dS/m en las simulaciones de 5, 10 y 20% de TTS, superando el umbral de salinidad de 3 dS/m (Figura 14) y provocando ligeras pérdidas de rendimiento. Esto es debido a que en algunas situaciones es conveniente superar este umbral añadiendo agua subterránea salobre, ya que la cantidad de nutrientes que contiene hacen que se reduzca el coste de la solución de fertirrigación obteniendo el PPI máximo. En el paso de un 25% a 20% de disponibilidad de TTS se observa cómo se reduce el coste de fertirrigación de 1,384 a 1,375 €/m<sup>3</sup> al aumentar el aporte de agua subterránea salobre en la mezcla, de tal forma que compensa la reducción de la productividad del agua de 36,4 a 36,35 kg/m<sup>3</sup> debida a la salinidad de 3,01 dS/m.

Con un 30% de disponibilidad el beneficio sería de 24.857 €/ha e iría mermando hasta un mínimo de 24.045 €/ha con suministro nulo, lo que supondría una disminución anual de 812 €/ha. Este descenso es perfectamente asumibles dado el elevado valor del beneficio en este cultivo.

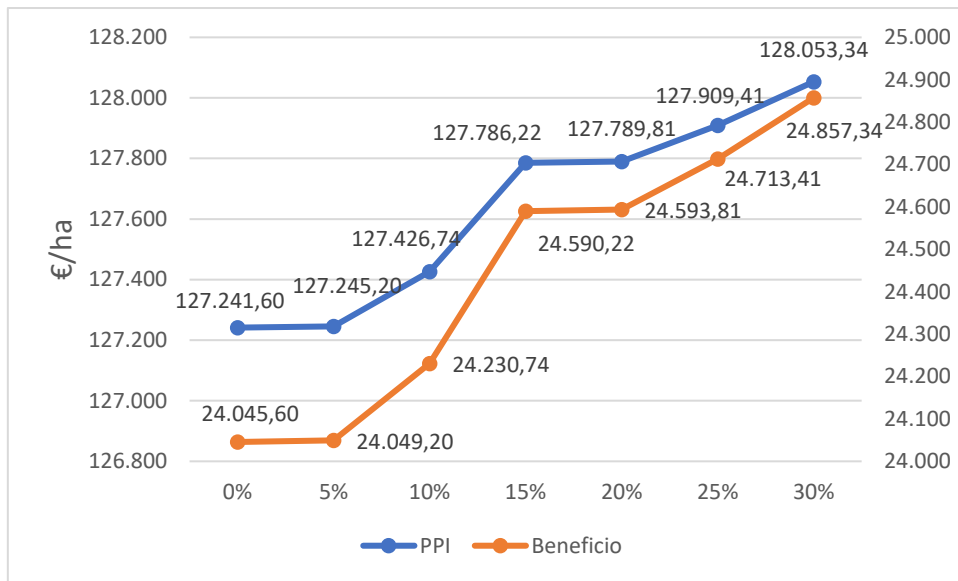


Figura 13. Evolución del PPI y beneficio de la mezcla óptima en lechuga según la disponibilidad de agua del TTS.

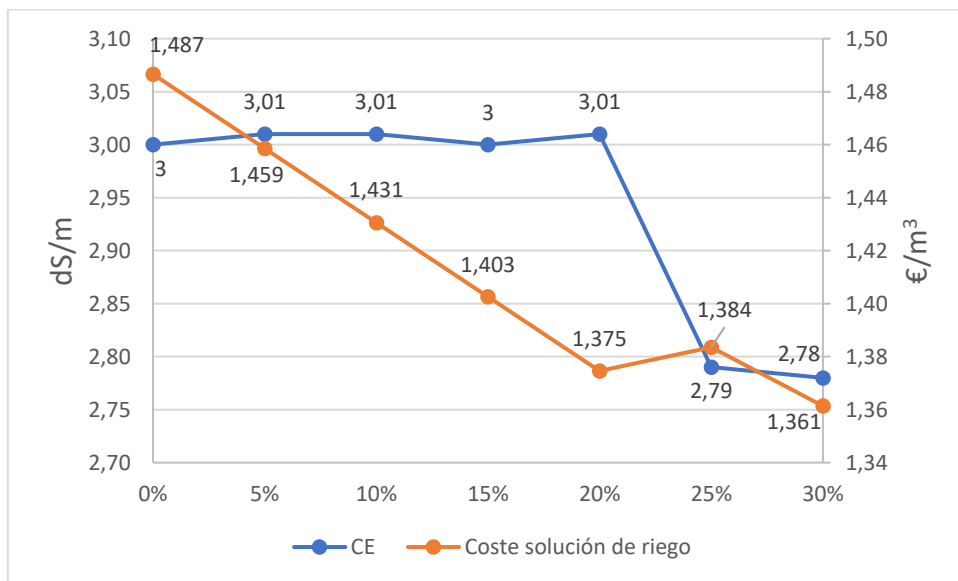


Figura 14. Evolución de la CE y coste de solución de riego de la mezcla óptima en lechuga según la disponibilidad de agua del TTS.

### 4.3.2. Limón

En todos los casos estudiados la mezcla óptima está compuesta por 20% de agua subterránea salobre, toda el agua del TTS disponible, y el resto se completa con AMD. Esto se debe a que el agua salobre de pozo es la más económica y aporta nutrientes que permiten reducir el gasto en abonos, por lo que se aporta la cantidad máxima que no conlleve una reducción de rendimiento por la excesiva salinidad de la solución de riego.

En la Figura 15 se observa la reducción del PPI y del beneficio conforme se limita la disponibilidad de agua del TTS. En este caso, la reducción si se produce de forma lineal ya que en todas las simulaciones se tiene una productividad máxima de 7,5 kg/m<sup>3</sup>, y la mezcla de aguas varía de la misma forma en cada caso: reduciéndose un 5% el agua del TTS sustituyéndola por AMD. El coste del agua aumentaría en 0,022 €/m<sup>3</sup> con cada reducción del 5% de TTS, y la combinación de abonos en la solución sería mínima y similar en todos los casos ya que la mayoría de nutrientes se aportan con el agua salobre de pozo.

Con disponibilidad del 30% de TTS se obtendría la solución nutritiva más barata de 0,467 €/m<sup>3</sup> y el máximo beneficio de 5.157 €/ha. Considerando un cese de suministro del trasvase el coste de la solución nutritiva ascendería a 0,599 €/m<sup>3</sup> obteniendo un beneficio de 4.312 €/ha. Esto resultaría en unas pérdidas de 845 €/ha, cifra significativa ya que supone un 16% de los limitados beneficios del cultivo de limón. Esta reducción de los beneficios sumada a la inestabilidad de los precios del sector supondría una grave amenaza para la viabilidad del cultivo tradicional de limón.

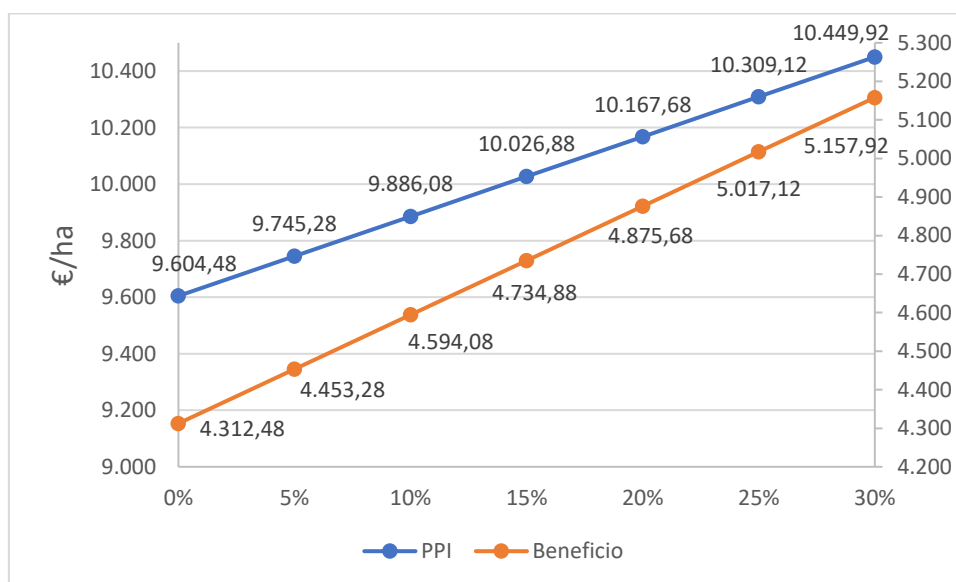


Figura 15. Evolución del PPI y beneficio de la mezcla óptima en limón según la disponibilidad de agua del TTS.

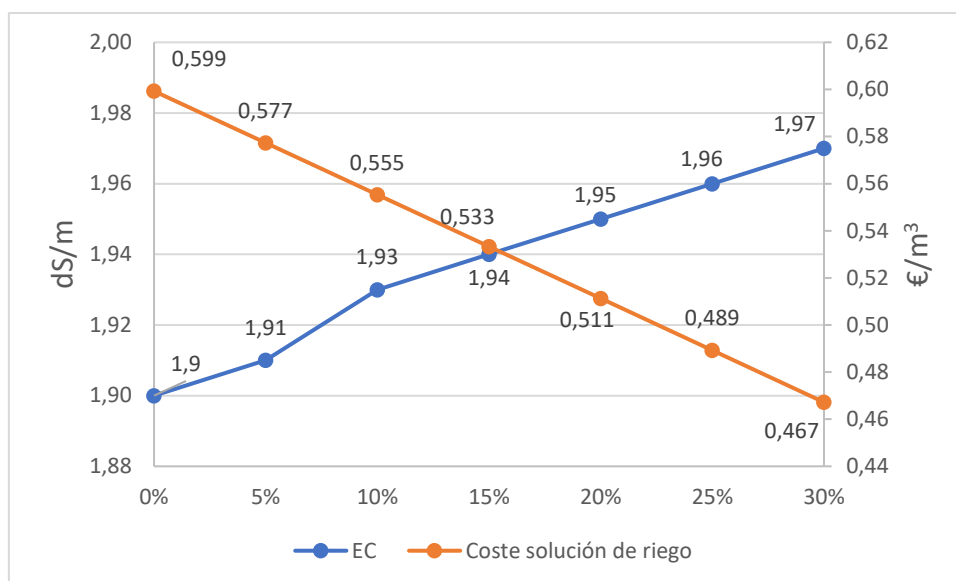


Figura 16. Evolución de la CE y coste de solución de riego de la mezcla óptima en limón según la disponibilidad de agua del TTS.

#### 4.4. Estimación de emisiones para los diferentes escenarios de suministro hídrico

La incorporación de AMD supondría un aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero, respecto a un escenario de uso exclusivo de recursos hídricos convencionales, debido a la alta demanda energética del proceso de desalación. En la actualidad, el consumo energético conlleva altas emisiones de GEI, ya que la generación eléctrica aún depende en gran medida de fuentes contaminantes como los combustibles fósiles. En la Figura 14 se muestran las toneladas de equivalentes de  $\text{CO}_2/\text{m}^3$  emitidas por la generación de energía requerida para el suministro de agua de riego para los escenarios ES1-ES3 de sustitución parcial y total de los recursos hídricos por AMD. Se muestran los datos para el año 2021 y las proyecciones para los años 2025 y 2030, atendiendo a los objetivos de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC) 2021-2030.

Con el mix energético actual (2021), la cantidad de emisiones de GEI se ve muy afectada conforme aumenta la incorporación de AMD. Se observa un aumento de  $0,26 \text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$  en el paso del ES1 al ES3, pasando de  $0,13 \text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$  en el escenario sin AMD hasta  $0,39 \text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$  con la sustitución total. Se produciría así un aumento de un 205% en el paso del ES1 al ES2 con unas emisiones de  $0,26 \text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$  y un aumento del 311% del ES1 al ES3. Sin embargo, estos valores se reducen destacablemente en las proyecciones para 2030 y 2050. Dado que el factor de emisión ( $\text{tCO}_2\text{eq}/\text{MWh}$ ) depende directamente de la cantidad de emisiones de la generación de energía, se estima que para 2030 el factor de emisión será de  $0,078 \text{ tCO}_2\text{eq}/\text{MWh}$ . Para el año 2030 las emisiones serían de  $0,22 \text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$  y para el año 2050 se espera conseguir la neutralidad de emisiones. Esto supondría una reducción de  $0,17 \text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$  respecto a las  $0,39 \text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$  del año 2021, disminuyendo las emisiones un 44%. Además, es destacable que las emisiones de  $0,26 \text{ kgCO}_2\text{eq}/\text{m}^3$  estimadas para el año 2021 en el ES2

de sustitución parcial serían mayores que las obtenidas en el escenario de sustitución total (ES3) para el año 2030 ( $0,22 \text{ kgCO}_2\text{eq/m}^3$ ), mostrando la sustancial reducción de la contaminación que se puede llegar a alcanzar si en el futuro se incorporan energías limpias en el mix energético.

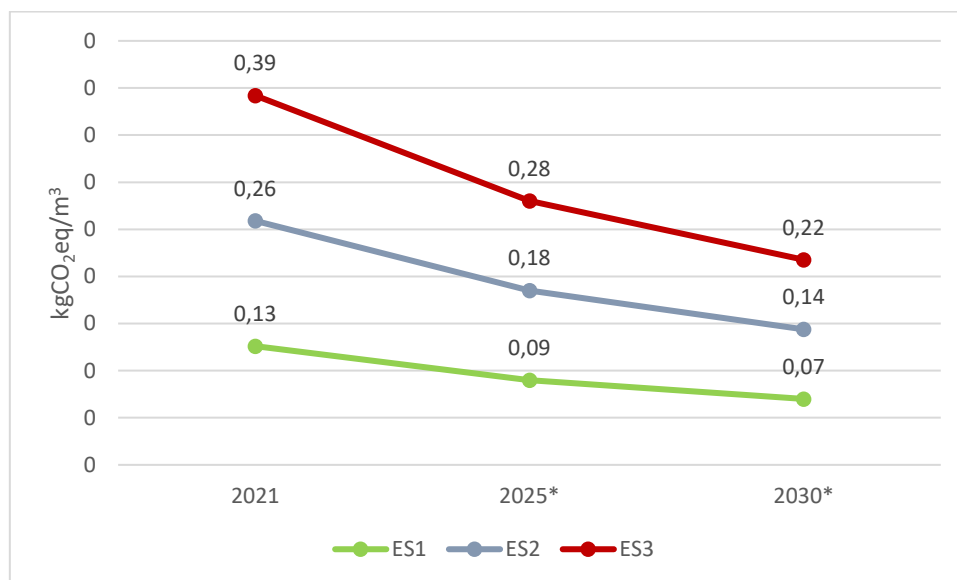


Figura 17. Proyección de las emisiones de  $\text{kgCO}_2\text{eq/m}^3$  asociadas a la implementación de AMD para 2021-2030 en los escenarios supuestos.

\*Datos estimados a partir del factor de emisión supuesto para alcanzar los objetivos del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima 2021-2030.

Las emisiones de GEI debidas al riego con AMD para los cultivos en estudio, se han estimado en función de las necesidades hídricas anuales de  $6.378 \text{ m}^3/\text{ha}$  del limón y  $6.483 \text{ m}^3/\text{ha}$  de la lechuga NFT. Para estos volúmenes de riego se estimaron unas emisiones anuales de  $2,50 \text{ tCO}_2\text{eq/ha}$  para el limón y  $2,54 \text{ tCO}_2\text{eq/ha}$  para la lechuga. Estudios realizados en la zona, muestran que las emisiones anuales debidas a la producción de limón y lechuga NFT podrían llegar a  $12,83$  y  $31,07 \text{ tCO}_2\text{eq/ha}$  respectivamente para un escenario de uso exclusivo de AMD (Górriz y Colaboradores, 2020; Martínez-Mate y Colaboradores, 2018). Estos estudios se realizaron siguiendo la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV), que tiene en cuenta los procesos de forma global, permitiendo estudiar las emisiones de un producto o actividad a lo largo de su ciclo de vida. Estos análisis se realizaron “from cradle to gate”, por lo que incluían las fases de extracción de materias primas, transporte a la explotación, utilización en el cultivo y transporte de residuos. Atendiendo a los valores de estos estudios, el riego con AMD supondría un aumento anual de emisiones de GEI del 13% en limón y del 5% en la lechuga NFT, destacando la importancia relativa del modelo de explotación.

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este estudio se ha analizado el impacto económico y las emisiones de GEI que supondría la incorporación parcial y total del agua marina desalinizada como fuente de agua de riego en la Cuenca del Segura. En concreto se han estudiado los casos de la lechuga en sistema hidropónico de alto rendimiento y el limón un cultivo tradicional en suelo, que representan dos casos extremos desde el punto de vista económico. El programa Irriblend-DSW ha permitido identificar la combinación que optimiza el uso de fertilizantes y agua, obteniendo los datos de rentabilidad para cada caso de suministro estudiado. Se ha calculado el aumento de emisiones que provocaría la sustitución de agua del TTS por AMD debido al elevado coste energético de su producción.

El impacto económico que supone la incorporación de AMD puede ser asumido en el caso de cultivos de alta rentabilidad como la lechuga NFT, ya que el aumento en los costes de producción derivado de la incorporación de AMD no es determinante cuando el beneficio es elevado y permite cubrir este sobrecoste. Al contrario, en los cultivos con beneficios más reducidos, como el limón, este incremento en los costes de producción puede ser el factor que diferencie pérdidas de ganancias.

Los resultados muestran como la integración de AMD al 50%/100% supondría una caída en el beneficio en torno a 6%/13% en cultivos de elevada rentabilidad como la lechuga NFT, pudiendo alcanzar valores del 21%/53% en cultivos menos rentables como el limón. Es aconsejable la mezcla de AMD con otras aguas, como la de pozo, con bajo coste y alto contenido en nutrientes, ya que permite reducir considerablemente el coste de fertirrigación, además de mitigar problemas agronómicos como la fitotoxicidad por boro que puede afectar a cultivos como los cítricos. El estudio indica que la mezcla óptima presentaría la cantidad máxima admisible de agua salobre de pozo que se puede añadir sin superar el umbral de salinidad del cultivo, luego se añadiría toda el agua del TTS disponible y se completaría la mezcla con AMD. En los casos estudiados la mezcla sería 30% TTS; 50% AMD; 20% ASS en limón y 30% TTS; 55% AMD; 15% ASS en lechuga.

Con el mix energético actual, la sustitución total de recursos convencionales por AMD implicaría un aumento del 311% en las emisiones de CO<sub>2</sub>eq debidas al suministro de riego. Sin embargo, estas cifras podrían disminuir a medio plazo, si se cumplen los objetivos de reducción de emisiones asociadas a la generación de energía (20.603 miles de tCO<sub>2</sub>eq en 2030 y neutralidad de emisiones en 2050). Las emisiones en el escenario de total sustitución de AMD podrían reducirse un 44% desde 2021 hasta 2030 y ser nulas para el año 2050.

Los resultados de este estudio ponen de manifiesto que es indispensable hacer un uso óptimo y combinado de los recursos disponibles para conservar la viabilidad económica de los cultivos y minimizar las emisiones de GEI. Para esto es aconsejable uso de herramientas de apoyo a la decisión como Irriblend-DSW para la gestión del AMD que permite obtener la solución de riego óptima dada la disponibilidad de aguas, fertilizantes y las necesidades nutricionales del cultivo.



## 6. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilera, E., Piñero, P., Infante Amate, J., González de Molina, M., Lassaletta, L., & Sanz Cobeña, A. (2020). Emisiones de gases de efecto invernadero en el sistema agroalimentario y huella de carbono de la alimentación en España. Real Academia de Ingeniería: Madrid, Spain.
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1985). Water quality for agriculture (Vol. 29, p. 174). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Alexandratos, N., & Bruinsma, J. (2012). World agriculture towards 2030/2050: the 2012 revision.
- Brechner, M., Both, A. J., & Staff, C. E. A. (1996). Hydroponic lettuce handbook. *Cornell Controlled Environment Agriculture*, 834, 504-509
- CARM (Comunidad Autónoma de la Región de Murcia). Estadística Agraria de Murcia (2010-2011; 2012-2013; 2014-2015; 2016-2017; 2017-2018; 2018-2019; 2019-2020).
- Cerda, A., Nieves, M., & Guillen, M. G. (1990). Salt tolerance of lemon trees as affected by rootstock. *Irrigation science*, 11(4), 245-249.
- CHS (Confederación Hidrográfica del Segura). La Cuenca. Disponible online: <https://www.chsegura.es/es/cuenca/> (Acceso marzo de 2022).
- CHS (Confederación Hidrográfica del Segura). Propuesta de Proyecto de Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura (revisión para el tercer ciclo: 2022-2027) Memoria.
- Cornejo, P. K., Santana, M. V., Hokanson, D. R., Mihelcic, J. R., & Zhang, Q. (2014). Carbon footprint of water reuse and desalination: a review of greenhouse gas emissions and estimation tools. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 4(4), 238-252.
- Cashman, A., Souvignet, M., Schuster, S., & Zwick, S. (2018). Climate insurance and water-related disaster risk management: Unlikely partners in promoting development?. *Global Water Partnership*, 1-32.
- Ercin, A. E., & Hoekstra, A. Y. (2014). Water footprint scenarios for 2050: A global analysis. *Environment international*, 64, 71-82.
- ESAMUR. Reutilización de aguas depuradas en riego agrícola en la Región de Murcia. Disponible online: <https://www.esamur.com/reutilizacion> (Acceso marzo de 2022)
- FAO, 2002. Agricultural drainage water management in arid and semi-arid areas. *Irrigation and Drainage Paper* 61. Disponible online: <http://www.fao.org/3/y4263e/y4263e00.htm> (Acceso marzo de 2022).
- FEPEX (Federación Española de Asociaciones de Productores Exportadores de Frutas, Hortalizas, Flores y Plantas vivas). La exportación de frutas y hortalizas en 2020. Disponible online: <https://www.fepex.es/datos-del-sector/exportacion-importacion-espa%C3%B1ola-frutas-hortalizas> (Acceso marzo de 2022).
- Gallego-Elvira, B., Reza, J., Martín-Gorrioz, B., Maestre-Valero, J. F., & Martínez-Alvarez, V. (2021). Irriblend-DSW: A decision support tool for the optimal blending of desalinated and conventional irrigation waters in dry regions. *Agricultural Water Management*, 255, 107012.
- García García, J. (2014). Análisis del sector del limonero y evaluación económica de su cultivo. Instituto Murciano de Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario.
- Górriz, B. M., Elvira, B. G., Martínez, V., & Valero, J. F. M. (2020). Balance de carbono de las zonas regables del trasvase tajo-segura. In XXXVIII Congreso Nacional de Riegos. Parte

- I: Jornada virtual de riegos 23-9-2020 (pp. 149-156). Universidad Politécnica de Cartagena.
- Huang, Z., Hejazi, M., Tang, Q., Vernon, C. R., Liu, Y., Chen, M., & Calvin, K. (2019). Global agricultural green and blue water consumption under future climate and land use changes. *Journal of Hydrology*, 574, 242-256.
- Kundzewicz, Z. W., Mata, L. J., Arnell, N. W., Döll, P., Jimenez, B., Miller, K., ... & Shiklomanov, I. (2008). The implications of projected climate change for freshwater resources and their management. *Hydrological sciences journal*, 53(1), 3-10.
- La Verdad. El ministerio subvencionará el agua desalada en función del coste de la electricidad. Disponible online: <https://www.laverdad.es/murcia/ministerio-subvencionara-agua-20220105001143-ntvo.html> (Acceso marzo de 2022).
- Luo, T., Young, R., & Reig, P. (2015). Aqueduct projected water stress country rankings. Technical Note, 16.
- Maestre-Valero, J. F., González-Ortega, M. J., Martínez-Álvarez, V., & Martin-Gorriz, B. (2019). The role of reclaimed water for crop irrigation in southeast Spain. *Water Supply*, 19(5), 1555-1562.
- Maestre-Valero, J. F., Martin-Gorriz, B., Soto-García, M., Martínez-Mate, M. A., & Martínez-Alvarez, V. (2018). Producing lettuce in soil-based or in soilless outdoor systems. Which is more economically profitable?. *Agricultural Water Management*, 206, 48-55.
- Martin-Gorriz, B., Martínez-Alvarez, V., Maestre-Valero, J. F., & Gallego-Elvira, B. (2021). Influence of the water source on the carbon footprint of irrigated agriculture: a regional study in South-Eastern Spain. *Agronomy*, 11(2), 351.
- Martinez-Mate, M. A., Martin-Gorriz, B., Martínez-Alvarez, V., Soto-García, M., & Maestre-Valero, J. F. (2018). Hydroponic system and desalinated seawater as an alternative farm-productive proposal in water scarcity areas: Energy and greenhouse gas emissions analysis of lettuce production in southeast Spain. *Journal of Cleaner Production*, 172, 1298-1310.
- Martínez-Alvarez, V., Gallego-Elvira, B., Maestre-Valero, J. F., Martin-Gorriz, B., & Soto-Garcia, M. (2020). Assessing concerns about fertigation costs with desalinated seawater in south-eastern Spain. *Agricultural Water Management*, 239, 106257.
- Martínez-Alvarez, V., Maestre-Valero, J. F., González-Ortega, M. J., Gallego-Elvira, B., & Martin-Gorriz, B. (2019). Characterization of the agricultural supply of desalinated seawater in Southeastern Spain. *Water*, 11(6), 1233.
- Martínez-Granados, D., Maestre-Valero, J. F., Calatrava, J., & Martínez-Alvarez, V. (2011). The economic impact of water evaporation losses from water reservoirs in the Segura basin, SE Spain. *Water Resources Management*, 25(13), 3153-3175
- Miller, S., Shemer, H., & Semiat, R. (2015). Energy and environmental issues in desalination. *Desalination*, 366, 2-8.
- Molina, J. L., García-Aróstegui, J. L., Bromley, J., & Benavente, J. (2011). Integrated assessment of the European WFD implementation in extremely overexploited aquifers through participatory modelling. *Water Resources Management*, 25(13), 3343-3370.
- Mekonnen, M. M., & Hoekstra, A. Y. (2016). Four billion people facing severe water scarcity. *Science advances*, 2(2), e1500323.

- Murcia Plaza. Especial Agroalimentario: radiografía de un sector clave para la Región de Murcia. Disponible online: <https://murciaplaza.com/especial-agroalimentario-plaza-radiografia> (Acceso febrero de 2022).
- Qadir, M., Sharma, B. R., Bruggeman, A., Choukr-Allah, R., & Karajeh, F. (2007). Non-conventional water resources and opportunities for water augmentation to achieve food security in water scarce countries. *Agricultural water management*, 87(1), 2-22.
- REE (Red Eléctrica de España). Disponible online: <https://www.ree.es/es/datos/generacion> (Acceso marzo de 2022).
- Rey, D., Garrido, A., & Calatrava, J. (2016). An innovative option contract for allocating water in inter-basin transfers: the case of the Tagus-Segura Transfer in Spain. *Water Resources Management*, 30(3), 1165-1182.
- Sadhvani, J. J., Veza, J. M., & Santana, C. (2005). Case studies on environmental impact of seawater desalination. *Desalination*, 185(1-3), 1-8.
- Soria, A., 2008. La fertirrigación del limonero. Consejería de Agricultura y Agua. Región de Murcia, Murcia, España.
- Shukla, P. R., Skea, J., Calvo Buendia, E., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H. O., Roberts, D. C., ... & Malley, J. (2019). IPCC, 2019: Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems.
- United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2019). *World Population Prospects 2019: Highlights (ST/ESA/SER.A/423)*
- Valero, J. F. M., Álvarez, V. M., Elvira, B. G., & Górriz, B. M. (2018). Aspectos agronómicos a considerar en el riego con agua marina desalinizada. In *Congreso Nacional del Agua Orihuela: Innovación y Sostenibilidad* (pp. 167-188). Universitat d' Alacant/Universidad de Alicante.
- Villar-Navascués, R., Ricart, S., Gil-Guirado, S., Rico-Amorós, A. M., & Arahuetes, A. (2020). Why (not) desalination? Exploring driving factors from irrigation communities' perception in South-East Spain. *Water*, 12(9), 2408.
- World Bank. Agriculture and Food. Overview. Disponible online: <https://www.worldbank.org/en/topic/agriculture/overview> (Acceso febrero de 2022).
- WRI (World Resources Institute). Ranking the World's Most Water-Stressed Countries in 2040. Disponible online: <https://www.wri.org/insights/ranking-worlds-most-water-stressed-countries-2040> (Acceso febrero de 2022).