



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Desarrollo de evaluadores hidroeconómicos y ambientales  
aplicados a la gestión de Recursos Hídricos en la  
Demarcación Hidrográfica del Segura

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: Marcon, Julieta del Pilar

Tutor/a: Pulido Velázquez, Manuel Augusto

Cotutor/a: Macián Sorribes, Héctor

Director/a Experimental: LAGOS CASTRO, IVAN GERARDO

CURSO ACADÉMICO: 2023/2024

# Trabajo Fin de Máster

## *DESARROLLO DE EVALUADORES HIDROECONÓMICOS Y AMBIENTALES APLICADOS A LA GESTIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS EN LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL SEGURA*

**Intensificación:**

*ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS*

**Autor:**

*JULIETA DEL PILAR MARCÓN*

**Tutor:**

*DR. MANUEL PULIDO VELÁZQUEZ*

**Cotutor/es:**

*DR. HÉCTOR MACIÁN SORRIBES*

**Director Experimental:**

*IVÁN GERARDO LAGOS CASTRO*

**MAYO, 2024**



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente  
**mihma**



## Resumen del Trabajo de Fin de Máster

### Datos del proyecto

**Título del TFM en español:** Desarrollo de evaluadores hidroeconómicos y ambientales aplicados a la gestión de Recursos Hídricos en la Demarcación Hidrográfica del Segura

**Título del TFM en inglés:** Development of hydroeconomic and environmental evaluators applied to the management of water resources in the Segura Basin.

**Título del TFM en Valenciano:** Desenvolupament d'avaluadors hidroeconòmics i ambientals aplicats a la gestió de Recursos Hídrics en la Demarcació Hidrogràfica del Segura

**Alumno:** JULIETA DEL PILAR MARCÓN

**Tutor:** DR. MANUEL AUGUSTO PULIDO VELÁZQUEZ

**Cotutor/es:** DR. HÉCTOR MACIÁN SORRIBES

**Director experimental:** IVÁN GERARDO LAGOS CASTRO

**Fecha de Lectura:** MAYO, 2024

### Resumen

#### ESPAÑOL

El trabajo de final de máster que se expone en el presente texto se ha desarrollado en el contexto de un proyecto del grupo de Investigación de Modelos Hidroeconómicos (GIMHE) del Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA-UPV), en el que se han desarrollado evaluadores hidroeconómicos y ambientales que posibilitan la estimación de costes, beneficios, emisiones de dióxido de carbono y análisis de cumplimiento de caudales ecológicos derivados de la gestión de recursos hídricos en la Demarcación Hidrográfica del Segura, cuenca de reconocida complejidad por su escasez de recursos y elevadas demandas, situada en el sureste español.

Como punto de partida, ha sido necesario identificar los elementos que intervienen en la gestión de recursos hídricos y que representan mayores costes en toda la Demarcación, entre los que destacan impulsiones en el sistema superficial, instalaciones desaladoras de agua de mar, estaciones depuradoras de aguas residuales y bombeos de aguas subterráneas para suministros de demandas agrarias caracterizados con su consumo energético. En cuanto a los beneficios, se han considerados los generados por centrales hidroeléctricas y unidades de demanda agraria.

De los elementos del sistema de recursos hídricos analizados, se han estimado también las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera, dato que adquiere día a día más importancia por

su conocida incidencia en el cambio climático. Finalmente, en el evaluador ambiental, se incluye la verificación de cumplimiento de caudales ecológicos asociados a la gestión de recursos, siendo consciente del impacto social que este instrumento conlleva.

Los evaluadores, se han desarrollado para trabajar en dos posibles escenarios de predicción hidroclimática: a corto plazo, considerando un período de 15 días, o en período estacional de 7 meses. La principal diferencia entre un escenario y el otro, es que el beneficio de las unidades de demanda agrarias asociado a la gestión de recursos hídricos solo se estima en período estacional, ya que es dónde se puede apreciar el rendimiento de los cultivos según las necesidades de riego cubiertas o no.

En el desarrollo de los evaluadores se ha consultado con reseñas bibliográficas, información publicada por la Confederación Hidrográfica y expertos en el tema, con el fin de caracterizar a los elementos que forman parte de la herramienta de la forma más fehaciente posible, para luego demostrar que los resultados obtenidos son válidos. Se presentará metodología de análisis de resultados tomando como ejemplo la Demarcación Hidrográfica del Segura, con datos históricos de gestión en el período 1980-2012.

Una virtud por resaltar de las herramientas elaboradas es la facilidad de adecuación ante modificaciones de costes, consumos o emisiones en los elementos del sistema incorporados y la aplicación en otras Demarcaciones Hidrográficas que requieran de los evaluadores para fundamentar decisiones en la gestión de recursos hídricos.

## VALENCIÀ

El treball de final de màster que s'exposa en el present text s'ha desenvolupat en el context d'un projecte del grup d'Investigació de Models Hidro-econòmics (GIMHE) de l'Institut Universitari d'Investigació d'Enginyeria de l'Aigua i Medi Ambient (IIAMA-UPV), en el qual s'han desenvolupat avaluadors hidroeconòmics i ambientals que possibiliten l'estimació de costos, beneficis, emissions de diòxid de carboni i anàlisi de compliment de cabals ecològics derivats de la gestió de recursos hídrics aplicats en la Demarcació Hidrogràfica del Segura, conca de reconeguda complexitat per la seua escassetat de recursos i elevades demandes, situada en el sud-est espanyol.

Com a punt de partida, ha sigut necessari identificar elements que intervenen en la gestió de recursos hídrics i que representen majors costos en tota la Demarcació, entre els quals es destaquen impulsions en el sistema superficial, instal·lacions dessaladores d'aigua de mar, estacions depuradores d'aigües residuals i bombaments d'aigües subterrànies per a subministraments de demandes agràries caracteritzats amb el seu consum energètic. Quant als beneficis, s'han considerats els generats per centrals hidroelèctriques i unitats de demanda agrària.

Dels elements del sistema de recursos hídrics analitzats, s'han estimat també les emissions de diòxid de carboni a l'atmosfera, dada que adquireix dia a dia més importància per la seua coneguda incidència en el canvi climàtic. Finalment, en l'avaluador ambiental, s'inclou la verificació de

compliment de cabals ecològics associats a la gestió de recursos, sent conscient de l'impacte social que aquest instrument comporta.

Els avaluadors s'han desenvolupat per a treballar en dos possibles escenaris de predicció hidroclimàtica: a curt termini, considerant un període de 15 dies, o en període estacional de 7 mesos. La principal diferència entre un escenari i l'altre, és que el benefici de les unitats de demanda agràries associat a la gestió de recursos hídrics solo s'estima en període estacional, ja que és on es pot apreciar el rendiment dels cultius segons les necessitats de reg cobertes o no.

En el desenvolupament dels avaluadors, s'ha consultat amb ressenyes bibliogràfiques, informació publicada per la Confederació Hidrogràfica i experts en el tema, amb la finalitat de caracteritzar als elements que formen part de l'eina de la forma més fefaent possible, per a després demostrar que els resultats obtinguts són vàlids. Es presentarà metodologia d'anàlisi de resultats prenent com a exemple la Demarcació Hidrogràfica del Segura, amb dades històriques de gestió en el període 1980-2012.

Una virtut a ressaltar de les eines elaborades és la facilitat d'adequació davant modificacions de costos, consums o emissions en els elements del sistema incorporats i l'aplicació en altres Demarcacions Hidrogràfiques que requerisquen dels avaluadors per a fonamentar decisions en la gestió de recursos hídrics.

## ENGLISH

The master's thesis presented in this text has been developed in the context of a project by the Hydroeconomic Models Research Group (GIMHE) of the Water and Environmental Engineering Research Institute (IIAMA-UPV), where hydroeconomic and environmental evaluators have been developed to estimate costs, benefits, carbon dioxide emissions and analysis of compliance with ecological flows derived from the management of water resources applied in the Segura Hydrographic Demarcation, a basin of recognized complexity due to its scarcity of resources and high demands, located in southeastern Spain.

As a starting point, it has been necessary to identify the elements involved in water resources management and representing the highest costs throughout the Demarcation, including pumping systems in the surface water system, seawater desalination plants, wastewater treatment plants, and groundwater pumping for agricultural demands characterized by their energy consumption. Regarding benefits, those generated by hydroelectric power plants and agricultural demand units have been considered.

From the analysed elements of the water resources system, carbon dioxide emissions into the atmosphere have also been estimated, data that is gaining increasing importance due to its known impact on climate change. Finally, the environmental evaluator includes the verification of compliance with ecological flow requirements associated with resource management, being aware of the social impact that this instrument entails.

The evaluators have been developed to work in two possible hydroclimatic prediction scenarios: short-term, considering a period of 15 days, or seasonal, covering a 7-month period. The main

difference between one scenario and the other is that the benefit of agricultural demand units associated with water resources management is only estimated in the seasonal period since it is where the performance of crops according to covered or uncovered irrigation needs can be appreciated.

In the development of the evaluators, consultations have been made with bibliographic reviews, information published by the Hydrographic Confederation, and experts in the field, in order to characterize the elements that are part of the tool as faithfully as possible, and then demonstrate that the results obtained are valid. Methodology for analysing results will be presented using the Segura Hydrographic Demarcation as an example, with historical management data from the period 1980-2012.

One virtue to highlight about the developed tools is their ease of adaptation to changes in costs, consumption, or emissions in the incorporated system elements and their application in other Hydrographic Demarcations that require evaluators to substantiate decisions in water resources management.

**Palabras clave español:** gestión del agua; evaluación hidroeconómica; costes; beneficios; emisiones

**Palabras clave valenciano:** gestió de l'aigua; avaluació hidroeconòmica; costos; beneficis; emissions.

**Palabras clave inglés:** water management; hydroeconomic evaluation; costs; benefits; emissions



## **AGRADECIMIENTOS**

Agradecer a mis tutores Manuel y Héctor por la oportunidad de formar parte del proyecto, de brindar su experiencia y acompañamiento en el transcurso del trabajo. A Iván, quién fue mi compañero día a día, de quién aprendí muchas cosas, con su paciencia y conocimiento hizo posible que el desarrollo de los evaluadores sea posible.

La culminación de este trabajo final de Máster significa el cierre de un proceso de crecimiento y aprendizaje que sin dudas marcarán mi futuro tanto a nivel profesional, como personal. Agradecer a mi familia y amigos, que me apoyaron y acompañaron en este camino, haciendo que todo sea más simple, aun estando tan lejos.

*A vos Ma, que me enseñaste a nunca bajar los brazos.*

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS .....	V
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VI
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	VII
1. MARCO GENERAL .....	1
1.1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.2. CONTEXTO DEL TFM DENTRO DEL PROYECTO SIAGES.....	2
1.3. OBJETIVOS .....	5
1.4. ESTRUCTURA DOCUMENTAL .....	5
2. ESTADO DEL ARTE.....	7
3. METODOLOGÍA.....	10
4. EVALUADOR HIDROECONÓMICO .....	14
4.1. IMPULSIONES EN EL SISTEMA SUPERFICIAL.....	15
4.2. INSTALACIONES DESALADORAS DE AGUA DE MAR .....	16
4.3. ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES.....	17
4.4. BOMBEO SUBTERRÁNEOS PARA SUMINISTRO DE DEMANDAS AGRARIAS .....	17
4.5. CENTRALES HIDROELÉCTRICAS.....	19
4.6. UNIDADES DE DEMANDA AGRARIA.....	20
5. EVALUADOR AMBIENTAL .....	21
5.1. IMPULSIONES EN EL SISTEMA SUPERFICIAL.....	22
5.2. INSTALACIONES DESALADORAS DE AGUA DE MAR .....	23
5.3. ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES.....	23
5.4. BOMBEO SUBTERRÁNEOS PARA SUMINISTRO DE DEMANDAS AGRARIAS .....	24
5.5. VERIFICACIÓN DE CUMPLIMIENTO DE CAUDAL ECOLÓGICO .....	25
6. CASO DE ESTUDIO: DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL SEGURA .....	26



7.	ELEMENTOS DEL SISTEMA DE RECURSOS HÍDRICOS.....	34
7.1.	IMPULSIONES EN EL SISTEMA SUPERFICIAL.....	34
7.2.	INSTALACIONES DESALADORAS DE AGUA DE MAR .....	36
7.3.	ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES.....	38
7.4.	BOMBEO PARA SUMINISTRO DE DEMANDAS AGRARIAS .....	40
7.5.	CENTRALES HIDROELÉCTRICAS.....	44
7.6.	UNIDADES DE DEMANDA AGRARIA.....	47
7.7.	CAUDALES ECOLÓGICOS EN MASAS DE AGUA SUPERFICIALES.....	48
8.	RESUMEN ESCENARIOS SIMULADOS.....	50
9.	RESULTADOS DEL EVALUADOR HIDROECONÓMICO.....	51
9.1.	RESULTADOS SIMULACIÓN SERIES HISTÓRICAS 1980-2011 .....	51
9.1.1.	IMPULSIONES EN SISTEMA SUPERFICIAL .....	51
9.1.2.	DESALADORAS DE AGUA DE MAR .....	54
9.1.3.	BOMBEO SUBTERRÁNEOS PARA SUMINISTRO DE DEMANDAS AGRARIAS .....	58
9.1.4.	CENTRALES HIDROELÉCTRICAS.....	60
9.1.5.	COSTES ACUMULADOS IMPULSIONES, DESALADORAS Y BOMBEO .....	62
9.1.6.	RELACIÓN ENTRE APORTACIONES AL SISTEMA Y VARIACIÓN COSTES OPERACIÓN.....	63
9.1.7.	RELACIÓN ENTRE COSTES DESALADORAS Y COSTES IMPULSIONES .....	64
9.2.	RESULTADOS SIMULACIÓN ENTORNO SIAGES PERÍODO ESTACIONAL.....	64
9.2.1.	IMPULSIONES EN SISTEMA SUPERFICIAL .....	65
9.2.2.	INSTALACIONES DESALADORAS DE AGUA DE MAR .....	67
9.2.3.	DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES.....	68
9.2.4.	BOMBEO SUBTERRÁNEOS PARA SUMINISTRO DE DEMANDAS AGRARIAS .....	71
9.2.5.	CENTRALES HIDROELÉCTRICAS.....	72
9.2.6.	BENEFICIOS UNIDADES DE DEMANDA AGRARIA .....	74

9.2.7. COSTES ACUMULADOS EN PERÍODO ESTACIONAL .....	75
9.3. RESULTADOS SIMULACIÓN ENTORNO SIAGES A CORTO PLAZO.....	76
9.3.1. IMPULSIONES EN SISTEMA SUPERFICIAL .....	77
9.3.2. INSTALACIONES DESALADORAS DE AGUA DE MAR .....	78
9.3.3. BOMBEO SUBTERRÁNEOS PARA SUMINISTRO DE DEMANDAS AGRARIAS .....	79
9.3.4. CENTRALES HIDROELÉCTRICAS.....	79
9.3.5. COSTES Y BENEFICIOS TOTALES A CORTO PLAZO .....	80
9.4. VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA .....	81
9.4.1. IMPULSIONES EN EL SISTEMA SUPERFICIAL.....	82
9.4.2. INSTALACIONES DESALADORAS DE AGUA DE MAR .....	83
9.4.3. BOMBEO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS.....	83
9.4.4. CENTRALES HIDROELÉCTRICAS.....	84
10. RESULTADOS DEL EVALUADOR AMBIENTAL .....	86
10.1. RESULTADOS SIMULACIÓN SERIES HISTÓRICAS 1980-2011 .....	86
10.1.1.IMPULSIONES EN SISTEMA SUPERFICIAL .....	86
10.1.2.INSTALACIONES DESALADORAS DE AGUA DE MAR (IDAM).....	88
10.1.3.EMISIONES DE CO <sub>2</sub> IMPULSIONES, DESALADORAS Y BOMBEO.....	89
10.1.4.RELACIÓN ENTRE APORTACIONES AL SISTEMA Y VARIACIÓN EMISIONES DE CO <sub>2</sub> .....	90
10.1.5.VERIFICACIÓN DE CUMPLIMIENTO CAUDALES ECOLÓGICOS .....	91
10.2. RESULTADOS SIMULACIÓN ENTORNO SIAGES PERÍODO ESTACIONAL.....	93
10.2.1.ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES.....	93
10.2.2.EMISIONES DE CO <sub>2</sub> IMPULSIONES, DESALADORAS, DEPURADORAS Y BOMBEO.....	94
10.2.3.VERIFICACIÓN DE CUMPLIMIENTO CAUDALES ECOLÓGICOS .....	95
10.3. RESULTADOS SIMULACIÓN ENTORNO SIAGES A CORTO PLAZO.....	97
10.3.1.EMISIONES DE CO <sub>2</sub> TOTALES A CORTO PLAZO .....	98

10.4. VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA .....	99
10.4.1.IMPULSIONES EN EL SISTEMA SUPERFICIAL.....	99
10.4.2.INSTALACIONES DESALADORAS DE AGUA DE MAR .....	100
11. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD .....	102
12. CONCLUSIONES, LIMITACIONES Y LÍNEAS FUTURAS.....	104
12.1. CONCLUSIONES GENERALES.....	104
12.2. CONCLUSIONES REFERIDAS A CASO DE ESTUDIO .....	105
12.3. LIMITACIONES Y LÍNEAS FUTURAS .....	105
13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	107

## **ANEXOS**

ANEXO 1: CARACTERIZACIÓN DE BOMBEO EN UNIDADES DE DEMANDA AGRARIAS

ANEXO 2: REGRESIONES ENTRE NIVELES PIEZÓMETROS – VOLUMEN ACUÍFERO

ANEXO 3: CARACTERIZACIÓN ECONÓMICA DE UNIDADES DE DEMANDA AGRARIA

ANEXO 4: CAUDALES ECOLÓGICOS MÍNIMOS EN MASAS DE AGUAS SUPERFICIALES

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen evaluador hidroeconómico .....	15
Tabla 2. Resumen evaluador ambiental .....	22
Tabla 3. Síntesis de asignaciones y reservas por usos (horizonte 2027) para el sistema de explotación único de la DHS. ....	33
Tabla 4. Caracterización de costes y emisiones de impulsiones en el sistema Tajo-Segura.....	36
Tabla 5. Caracterización de costes y emisiones de instalaciones desaladoras de agua de mar .....	38
Tabla 6. Caracterización de costes y emisiones de estaciones depuradoras de agua residual .....	40
Tabla 7. Caracterización de parque hidroeléctrico de la DHS. ....	45
Tabla 8. Estimación eficiencia centrales hidroeléctricas en CHS.....	46
Tabla 9. Caudales ecológicos mínimos en masas de agua superficiales .....	49
Tabla 10. Caudal de impulsiones en sistema superficial .....	51
Tabla 11. Resumen costes mensuales de impulsiones. Serie histórica .....	53
Tabla 12. Caudales mensuales producidos por las IDAMS .....	54
Tabla 13. Resumen costes mensuales de desaladoras de agua de mar. Serie histórica .....	57
Tabla 14. Resumen costes de bombeos para suministro de demandas agrarias. Serie histórica.....	59
Tabla 15. Caudales a turbinar centrales hidroeléctricas. ....	61
Tabla 16. Resumen beneficios mensuales centrales hidroeléctricas. Serie histórica .....	62
Tabla 17. Resumen de costes semanales de impulsiones. Entorno SIAGES - período estacional.....	66
Tabla 18. Resumen de costes semanales de desaladoras. Entorno SIAGES - período estacional.....	67
Tabla 19. Resumen de costes semanales de depuradoras. Entorno SIAGES - período estacional ....	69
Tabla 20. Beneficios semanales centrales hidroeléctricas. Entorno SIAGES - período estacional.....	73
Tabla 21. UDAs con mayores beneficios. Entorno SIAGES - período estacional .....	75
Tabla 22. Validación de herramienta Impulsiones en el sistema superficial año 2004 .....	82
Tabla 23. Coste unitario promedio de desaladoras de agua de mar en período histórico .....	83
Tabla 24. Promedios mensuales de caudal impulsado, emisiones de CO <sub>2</sub> y costes por emisiones de CO <sub>2</sub> . Serie histórica .....	87
Tabla 25. Promedios mensuales de caudal desalado, emisiones de CO <sub>2</sub> y costes por emisiones de CO <sub>2</sub> . Serie histórica .....	88
Tabla 26. Masas de agua superficiales con mayor cantidad de incumplimiento de caudales ecológicos. Serie histórica .....	92
Tabla 27. Resumen de emisiones de CO <sub>2</sub> semanales de depuradoras. Entorno SIAGES - período estacional.....	93
Tabla 28. Masas de agua superficiales con mayor cantidad de incumplimiento de caudales ecológicos. ....	97

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Esquema de trabajo SIAGES.....	3
Ilustración 2. Diagrama de flujo evaluador hidroeconómico .....	11
Ilustración 3. Diagrama de flujo evaluador ambiental .....	13
Ilustración 4. Ubicación Demarcación Hidrográfica del Segura dentro de la península Ibérica. ....	26
Ilustración 5. Identificación de masas de aguas superficiales Cuenca del Segura. ....	28
Ilustración 6. Identificación de masas de aguas subterráneas Cuenca del Segura. ....	31
Ilustración 7. Infraestructura hidráulica de trasvase Tajo-Segura.....	35
Ilustración 8. Ubicación de Instalaciones desaladoras de agua de Mar.....	37
Ilustración 9. Ubicación de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales.....	39
Ilustración 10. Distribución de Unidades de Demanda Agrarias y pozos de bombeos.....	41
Ilustración 11. Identificación de centrales hidroeléctricas en Cuenca del Segura. ....	45
Ilustración 12. Costes de operación en bombeos de aguas subterráneas para riegos. Serie histórica .....	58
Ilustración 13. Costes de operación bombeos de aguas subterráneas. Entorno SIAGES - período estacional.....	72
Ilustración 14. Beneficios de Unidades de Demanda Agraria. Entorno SIAGES - período estacional	74
Ilustración 15. Incumplimiento de caudales ecológicos en masas de aguas superficiales. Serie histórica.....	91
Ilustración 16. Incumplimiento de caudales ecológicos en masas de aguas superficiales. ....	96

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1. Distribución intraanual de la precipitación total anual en la DHS. ....	27
Gráfico 2. Regresión Altura de bombeo–Volumen acuífero “Sinclinal de la Higuera, otros” .....	43
Gráfico 3. Regresión Volumen inicial acuífero–Nivel piezométrico “Ascoy Sopalmo” .....	44
Gráfico 4. Curva Cota-Volumen embalse.....	47
Gráfico 5. Curva de Demanda Bruta “UDA 60–Regadíos aguas arriba de Puentes” .....	48
Gráfico 6. Costes mensuales de impulsiones. Serie histórica.....	52
Gráfico 7. Costes acumulados anuales de impulsiones. Serie histórica .....	52
Gráfico 8. Producción de agua desalada. Serie histórica.....	55
Gráfico 9. Costes acumulados anuales de desaladoras. Serie histórica .....	56
Gráfico 10. Costes porcentuales de desaladoras. Serie histórica.....	56
Gráfico 11. Beneficios mensuales centrales hidroeléctricas. Serie histórica .....	61
Gráfico 12. Costes porcentuales de desaladoras, impulsiones y bombeos. Serie histórica .....	62
Gráfico 13. Aportaciones y costes de operación SRH. Serie histórica .....	63
Gráfico 14. Diagrama de dispersión entre costes de desaladoras e impulsiones. Serie histórica .....	64
Gráfico 15. Costes semanales de impulsiones. Entorno SIAGES - período estacional .....	65
Gráfico 16. Valores porcentuales de costes impulsiones. Entorno SIAGES - período estacional.....	66
Gráfico 17. Valores porcentuales de costes desaladoras. Entorno SIAGES - período estacional .....	68
Gráfico 18. Valores porcentuales de costes depuradoras. Entorno SIAGES - período estacional .....	70
Gráfico 19. Costes operación estaciones depuradoras de aguas residuales Entorno SIAGES - período estacional .....	71
Gráfico 20. Beneficios semanales de centrales hidroeléctricas. Entorno SIAGES - período estacional .....	73
Gráfico 21. Costes de operación acumulados y volumen de agua suministrada. Entorno SIAGES - período estacional .....	76
Gráfico 22. Costes diarios de impulsiones. Entorno SIAGES – Escenario: corto plazo .....	77
Gráfico 23. Costes diarios de desaladoras. Entorno SIAGES – Escenario: corto plazo .....	78
Gráfico 24. Costes diarios de bombeos. Entorno SIAGES – Escenario: corto plazo .....	79
Gráfico 25. Beneficios diarios de centrales hidroeléctricas. Entorno SIAGES – Escenario: corto plazo .....	80
Gráfico 26. Costes totales y beneficios hidroeléctricos. Entorno SIAGES – Escenario: corto plazo... ..	81
Gráfico 27. Validación de herramienta Impulsiones en el sistema superficial. Consumo energético año 2004 .....	82
Gráfico 28. Validación de herramienta: estimación de costes de bombeos de aguas subterráneas. ....	84
Gráfico 29. Validación de herramienta: estimación de energía producida en el año 2006.....	85
Gráfico 30. Promedios mensuales de caudal impulsado, emisiones de CO <sub>2</sub> y costes por emisiones de CO <sub>2</sub> . Serie histórica .....	87

Gráfico 31. Promedios mensuales de caudal desalado, emisiones de CO <sub>2</sub> y costes por emisiones de CO <sub>2</sub> . Serie histórica .....	89
Gráfico 32. Valores porcentuales de emisiones de CO <sub>2</sub> debido a desaladoras, impulsiones y bombeos. Serie histórica .....	89
Gráfico 33. Relación entre aportaciones al sistema y emisión de CO <sub>2</sub> . Serie histórica.....	90
Gráfico 34. Promedios semanales de caudal depurado y emisiones de CO <sub>2</sub> . Entorno SIAGES - período estacional.....	94
Gráfico 35. Emisiones CO <sub>2</sub> acumuladas en el sistema y volumen de agua suministrada. Entorno SIAGES - período estacional.....	95
Gráfico 36. Emisiones CO <sub>2</sub> acumuladas entorno SIAGES. Período corto plazo .....	98
Gráfico 37. Consumo energético impulsión de Ojós período 2018 – 2021.....	99
Gráfico 38. Coste energético impulsión de Ojós período 2018 – 2021.....	100
Gráfico 39. Emisiones de CO <sub>2</sub> impulsión de Ojós período 2018 – 2021.....	100
Gráfico 40. Coste energético desaladoras MCT período 2015 – 2021.....	101
Gráfico 41. Emisiones de Dióxido de Carbono desaladoras MCT período 2015 – 2021.....	101
Gráfico 42. Análisis de sensibilidad coste de operación desaladoras. Serie histórica .....	102

## 1. MARCO GENERAL

---

### 1.1. INTRODUCCIÓN

El presente documento expone lo desarrollado en el Trabajo de Fin de Máster (TFM) en el contexto académico del Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente con énfasis en el análisis de sistemas de recursos hídricos de la Universitat Politècnica de València.

A lo largo de las últimas dos décadas, el avance de herramientas informáticas robustas, versátiles e interconectadas ha cobrado una importante relevancia en el ámbito de la gestión cortoplacista del recurso hídrico. El uso de gemelos digitales en la operación de sistemas de abastecimiento urbanos, o la generalización de los Sistemas Automáticos de Información Hidrológica (SAIH) para la monitorización de sistemas han supuesto hitos en el avance tecnológico de la operación de sistemas hídricos complejos. Estas tecnologías no solo permiten una representación digital precisa de los sistemas hídricos, sino que también ofrecen la capacidad de simular escenarios y predecir comportamientos con una precisión sin precedentes. Sin embargo, la relevancia de estas herramientas no reside únicamente en su sofisticación técnica, sino también en la necesidad imperiosa de integrar aspectos interdisciplinarios, hidroeconómicos y ambientales en su desarrollo y aplicación.

La gestión efectiva de los recursos hídricos en sistemas interconectados, con multiplicidad de fuentes del recurso y usos posibles, exige un enfoque holístico que abarque aspectos agrícolas, hidrológicos, operativos, económicos y ambientales, así como múltiples otros aspectos relevantes en la particularidad de cada sistema. Solo al considerar estos aspectos de manera integral es posible garantizar decisiones informadas y sostenibles que aborden los desafíos actuales y futuros relacionados con el agua y el cambio climático.

Bajo esta premisa, y con orientación innovadora e investigadora, diversos grupos de investigación del Instituto Universitario de Investigación de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente de la Universitat Politècnica de València (IIAMA-UPV) participaron en el desarrollo del proyecto SIAGES. A través del cual se buscaba desarrollar soluciones informáticas para el apoyo a la toma de decisiones en tiempo real en la gestión del agua. Dentro del marco de actuación integral del proyecto, una de las líneas de investigación buscaba abordar el aspecto hidroeconómico y ambiental de la operación de un sistema de gestión complejo y altamente interconectado. Es en el contexto de los desarrollos de esta línea de investigación en donde se enmarcan los trabajos expuestos en este trabajo final de máster y de los cuales se exponen sus aspectos más relevantes a lo largo del documento.

En particular, las actividades desarrolladas en el marco del proyecto mencionado que se constituyen como este TFM se enfocaron en el diseño y desarrollo de evaluadores hidroeconómicos



y ambientales con el objetivo de crear una herramienta de apoyo a la gestión del recurso hídrico con una mirada integral del sistema.

Comparativamente con otras herramientas existentes de este tipo, los evaluadores aquí desarrollados permiten centralizar en herramientas informáticas generalistas, versátiles y modulables diversos conceptos multidisciplinares involucrados en la gestión de sistemas complejos y altamente interconectados para la gestión del recurso hídrico. El diseño de los evaluadores siguió un enfoque hidroeconómico y ambiental que prioriza el análisis del sistema a partir de los costes, beneficios y emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) a la atmósfera como producto de la operación en tiempo real. De esta manera, los evaluadores permiten al usuario contar con aspectos que usualmente no se introducen con una justa relevancia en los procesos de toma de decisiones de gestión y de asignación de recursos.

En este TFM, se exponen las metodologías seguidas para el desarrollo de los evaluadores y los resultados obtenidos tras su utilización en el caso de estudio de la Demarcación Hidrográfica del Segura (DHS). Esta cuenca se sitúa en el sureste español y es de reconocida interconectividad y complejidad del sistema de gestión. Para compatibilizar un estado históricamente persistente de déficit hídrico con un elevado desarrollo agropecuario el sistema aprovecha la totalidad de las fuentes de recurso disponible (recurso natural superficial y subterráneo, retornos directos e indirectos de usos urbanos y agrícolas, desalinización y trasvases inter-cuencas).

## 1.2. CONTEXTO DEL TFM DENTRO DEL PROYECTO SIAGES

Los evaluadores desarrollados en este TFM formaron parte de los trabajos desarrollados y exitosamente integrados y validados en el contexto del proyecto SIAGES (Sistema Integrado de Ayuda a la Decisión), el cual es una solución desarrollada en el marco del proyecto *“DESARROLLO DE SOLUCIONES EN EL ÁMBITO DE LOS SISTEMAS INFORMÁTICOS DE APOYO A LA TOMA DE DECISIONES EN LA GESTIÓN DEL AGUA. CPP 02/2021 AB (DCCPI/OCPI)”*, y la cual involucra herramientas de simulación y optimización de sistemas de recursos hídricos capaces de procesar la información en tiempo real y de predicciones hidrometeorológicas con el fin de ofrecer múltiples escenarios de gestión integral del recurso hídrico.

De manera resumida la solución holística desarrollada en el proyecto SIAGES se compone por cinco líneas de trabajo que de manera secuencial ejecutan distintas herramientas (ver *Ilustración 1*) con las que el usuario puede conocer múltiples estados predictivos del sistema desde los aspectos hidrometeorológicos y las necesidades hídricas agrícolas, hasta escenarios de gestión del sistema bajo condiciones normales (*business as usual*) y de optimización hidroeconómica:

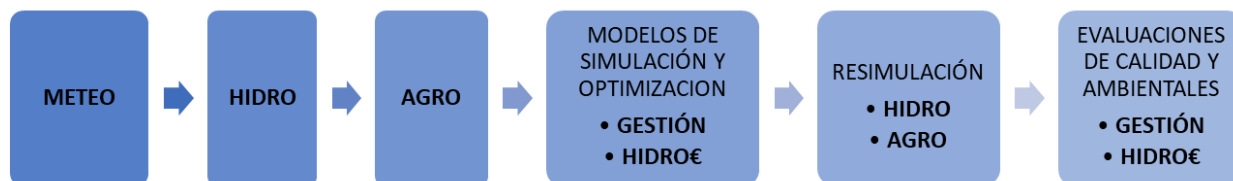


Ilustración 1. Esquema de trabajo SIAGES

A continuación, se resume brevemente el flujo de trabajo en el proyecto SIAGES y la participación de los evaluadores desarrollados en este flujo:

- Recopilación en tiempo real de información necesaria para la adecuada caracterización de condiciones iniciales del sistema, en donde se incluyen imágenes satelitales, predicciones meteorológicas por parte de organismos oficiales, estado de embalses, niveles piezométricos, estado de índices de sequía y escasez, y múltiples otras variables.
- **LINEA 1: METEO.** Genera predicciones meteorológicas a corto plazo (15 días) y en período estacional (7 meses). Las predicciones a **corto plazo** se realizan a escala diaria, en donde el servicio operacional de pronóstico meteorológico se ha implementado en tres etapas:
  1. Generación de predicciones meteorológicas por medio de la ejecución de modelos determinísticos (WRF/CALMET/GFS)
  2. Proceso de corrección del sesgo de previsiones
  3. Generación de resultados y transferencia a siguientes líneas de trabajo de SIAGES

Por su parte, las predicciones en **estacional** siguen 5 fases de trabajo:

1. Solicitud de información de predicciones estacionales del modelo SEAS5 del mes en curso y los datos del último mes de reanálisis ERA5, mediante API al Almacén de Datos del Servicio de Cambio Climático de Copernicus.
  2. Descarga de datos y conversión a escala diaria para el reanálisis.
  3. Recorte de datos al área en estudio
  4. Corrección de predicciones y reescaladas a la resolución ERA5 (0,25°x0,25°)
  5. Cálculo de Índices de Estado de Sequía (IES)
- **LINEA 2: HIDRO.** Realiza la simulación hidrológica, tanto superficial como subterránea en régimen natural, a partir de las predicciones realizadas por la LINEA 1. La simulación y predicción hidrológica superficial se ha realizado por medio del modelo ecohidrológico de balance continuo TETIS (Francés et al., 2007). Para la simulación de hidrología subterránea e interacción río-acuífero, se ha empleado el modelo MODFLOW (USGS, 2005).

Además, se ha empleado un Modelo de Error para corregir el sesgo de las predicciones de caudales y generar un número de trayectorias que representen la incertidumbre de la predicción realizada. El número de trayectorias a corto plazo es 21 y en estacional son 51.

- **LINEA 3: AGRO.** Se encarga de cuantificar la demanda agraria del recurso agua teniendo en cuenta la calidad, el grado de tecnificación del regadío y su impacto sobre el rendimiento de los cultivos, a partir de la información proporcionada por las LINEAS 1 y 2.  
La identificación de cultivos se realiza por medio de teledetección e inteligencia artificial (IA), cuando se ejecuta a corto plazo, o mediante la predicción de la superficie ocupada por cultivos hortícolas mediante el uso de técnicas de IA cuando se ejecuta en modo estacional.
- **LINEA 4: GESTIÓN.** Realiza predicciones determinísticas y probabilísticas sobre la gestión del agua en tiempo real, determina las asignaciones y procedencias de recursos y su calidad, evaluando la fiabilidad y riesgos, como también la gestión anticipada de sequías lo cual permite mitigar sus efectos.  
En su modelo de gestión se incluye la totalidad de demandas y usos, masas de agua superficiales y subterráneas, infraestructuras de almacenamiento y conducción, y fuentes no convencionales, integrando aspectos de cantidad, calidad y requerimientos medioambientales.
- **LINEA 5: HIDROECONÓMICA.** Evalúa y optimiza la gestión del sistema considerando aspectos ambientales y económicos.  
Esta línea de trabajo será la encargada de evaluar ambiental e hidroeconómicamente la gestión del sistema tras adoptarse cualquiera de los tres enfoques de gestión que ofrece SIAGES: simulación bajo condiciones de gestión actuales, optimización de gestión bajo un enfoque de redistribución del recurso y optimización de la gestión bajo un enfoque de eficiencia hidroeconómica.
- **LINEA 6: PLATAFORMA.** Desarrollo de plataforma de visualización y toma de decisiones en torno a la optimización de la gestión del recurso hídrico. A su vez, desarrolla un sistema de interoperabilidad permitiendo la integración modular y automatización conjunta de todas las líneas de trabajo mencionadas.

Como se puede observar, los evaluadores cuyo desarrollo se expone en el presente documento forman parte de la **línea de trabajo 5: HIDRO€**, ya que centralizan la información de todas las líneas precedentes, y después de un postproceso transforman la información de entrada dando como resultado series temporales indicativas tanto del impacto económico de la gestión del sistema en los

costes y beneficios operacionales, como del impacto ambiental de la gestión en el cumplimiento de regímenes de caudales ecológicos y en las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.

### 1.3. OBJETIVOS

El trabajo fin de máster realizado tiene como principal objetivo el desarrollo de evaluadores generalistas de modelos hidroeconómicos y ambientales que actúen como soporte en la toma de decisiones en la gestión de cualquier sistema de recursos hídricos (SRH), con especial utilidad en sistemas complejos y altamente interconectados.

Adicionalmente, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar herramientas modulares, abiertas y adaptables, extrapolables a cualquier SRH que se desee gestionar.
- Caracterizar económica y ambientalmente los principales elementos que componen un sistema de recursos hídricos.
- Desarrollar una metodología fácilmente interpretativa para el cálculo de costes de operación y emisiones de CO<sub>2</sub> en un SRH.
- Proponer una metodología de análisis de resultados, identificando elementos de mayor incidencia en costes de operación del sistema.

### 1.4. ESTRUCTURA DOCUMENTAL

El contenido de este TFM se ha estructurado en trece capítulos, comenzando con el marco general en donde se introduce a la temática a desarrollar.

El capítulo 2 trata del estado del arte resaltando las aportaciones y novedades incluidas en los evaluadores desarrollados.

El capítulo 3, se centra en la metodología de cálculo que se empleará en el desarrollo de los evaluadores. Se incluye un diagrama de flujo para cada una de las herramientas planteadas.

El capítulo 4 cuenta con el desarrollo del **evaluador hidroeconómico**, detallando las ecuaciones empleadas para la estimación de costes de operación y beneficios económicos de cada elemento del SRH.

De manera análoga, el capítulo 5 cuenta con el desarrollo del **evaluador ambiental**, con las ecuaciones empleadas y el procedimiento adoptado para la verificación del cumplimiento de caudales ecológicos.

En el capítulo 6 se presenta el caso de estudio: la Demarcación Hidrográfica del Segura. Cuenca hidrográfica en la cual se pondrán a prueba los evaluadores desarrollados.

En el séptimo capítulo se describen los elementos pertenecientes a la DHS que serán introducidos en las herramientas, con las correspondientes caracterizaciones económicas y ambientales.

En el capítulo 8 se describen los tres escenarios en que se pondrán a prueba los evaluadores: período histórico, período estacional y corto plazo, estos dos últimos realizados a partir de predicciones dentro del entorno SIAGES.

En los capítulos 9 y 10, se presentan los resultados obtenidos por medio de los evaluadores en la Demarcación Hidrográfica del Segura para los tres escenarios citados. Se incluyen metodologías de análisis de resultados propuestas para posibles aplicaciones futuras de los evaluadores y validaciones de las herramientas.

En el capítulo 11, se expone el análisis de sensibilidad del evaluador hidroeconómico tomando como referencia los costes de operación de las instalaciones desaladoras de agua de mar de mayor importancia en la demarcación.

Finalmente, en el capítulo 12 se exponen las conclusiones del trabajo realizado, diferenciando conclusiones generales, conclusiones referidas al caso de estudio, limitaciones y líneas futuras de investigación para complementar al presente trabajo académico.

En el capítulo 13, se expone la bibliografía consultada.

## 2. ESTADO DEL ARTE

---

En la actualidad, la sociedad exige una gestión mucho más eficiente y sostenible de los recursos hídricos, especialmente ante los más grandes y urgentes desafíos como la desertificación, la escasez del agua y el cambio climático. En el contexto social y climático actual, resulta fundamental aprovechar al máximo el potencial de las herramientas informáticas que nos permitan desarrollar estrategias adaptativas y resilientes que puedan hacer frente a estos desafíos de manera integral y sostenible. Integrar aspectos interdisciplinarios, hidroeconómicos y ambientales en estas herramientas es esencial para garantizar una gestión efectiva que equilibre las necesidades humanas con la conservación del medio ambiente y la protección de los ecosistemas acuáticos. En este contexto, el desarrollo y la aplicación de tecnologías avanzadas de análisis y simulación son cruciales para diseñar políticas y prácticas de gestión hídrica que sean tanto eficientes como respetuosas con el medio ambiente, asegurando así un suministro de agua seguro y sostenible para las generaciones presentes y futuras.

La evaluación hidroeconómica se ofrece como una herramienta unificadora para informar procesos de tomas de decisiones de gestión y medidas de adaptación a la par que se busca la minimización económica costes (Ward, 2021). En ella las fuentes y usos del recurso hídrico se caracterizan hidrológica y económicamente, y su integración con el sistema físico y las herramientas económicas se constituye como una de sus principales ventajas a la hora de apoyar los procesos de toma de decisiones y el establecimiento de políticas de planificación. En esencia, la evaluación hidroeconómica emplea el conocimiento científico para direccionar mejoras en las condiciones económicas en las que hay una carencia o escasez de recursos financieros, servicios ambientales y agua (Ward, 2021).

Los **evaluadores hidroeconómicos**, en general, están compuestos por procesos de análisis y evaluación integrando aspectos físicos, económicos, ambientales y legal-institucional relacionados con la gestión de recursos hídricos, en donde se incluyen costes y beneficios asociados al uso, conservación y distribución de agua, además de la planificación y toma de decisiones garantizando la sostenibilidad y conservación del buen estado de masas de agua.

Las investigaciones en modelos hidroeconómicos se fundamentan en cómo integrar aspectos hidrológicos y económicos de los elementos del sistema de recursos hídricos para evaluar la utilización óptima de los recursos. Contemplan todas las características del sistema, incluyendo hidrología superficial y subterránea, infraestructura existente con su respectiva caracterización económica y todo tipo de restricciones operativas, institucionales y ambientales. Brindan resultados de gestión de recursos y económicos.

Los primeros modelos hidroeconómicos comenzaron a desarrollarse alrededor de los años 60. Con el paso del tiempo, se han ido perfeccionando a partir de numerosos estudios que abordan

aspectos hidrológicos, ecológicos, económicos y sociopolíticos. A continuación, se listan algunas aplicaciones de modelos Hidroeconómicos encontrados en la literatura:

- **Samuelson (1952)**: simulación que obtiene como resultado un mercado perfectamente competitivo como solución de un problema de optimización.
- **Vaux y Howitt (1984)**: modelo no lineal de equilibrio interregional para evaluar el potencial de los mercados mitigando el impacto de la escasez de agua mediante su reasignación entre regiones de California, maximizando el beneficio social neto.
- **Booker and Young (1994)**: modelo complementario al de Vaux y Howitt, incorporando la red de flujo del sistema de recursos hídricos y su gestión (aportaciones, embalses, demandas, entre otros). Aplicado a cuenca del río Colorado, Estados Unidos.
- **Bielsa y Duarte (2001)**: modelo de asignación del agua entre dos grupos en competencia. Aplicado a riego y la generación de energía hidroeléctrica.
- **Heinz et al. (2007), Pulido-Velázquez (2008 y 2013)**: modelo de implementación de la Directiva Marco (en España), coste del recurso y diseño de políticas eficientes de precios.
- **Ward y Pulido-Velázquez (2008)**: modelo de trabajo a nivel de cuenca para evaluar los efectos hidrológicos y económicos de programas alternativos de fijación de precios del agua que cumplan con las regulaciones ambientales destinadas a preservar la calidad del agua.
- **Harou et al. (2009)**: revisión de técnicas destinadas a caracterizar el valor económico del uso del agua integrándolas en 80 modelos hidroeconómicos.
- **Foster et al. (2014)**: Modelación del comportamiento del riego en sistemas subterráneos.
- **Gohar et al. (2019)**: Gestión de la seguridad alimentaria e hídrica en Pequeños estados insulares. Modelación hidroeconómica de recursos subterráneos bajo estrés climático.

Múltiples han sido los avances en el ámbito de la evaluación hidroeconómica de sistemas. Sin embargo, la aplicación de estos modelos tradicionalmente se ha limitado a estudios de planificación para largos periodos de análisis, donde las escalas temporales se enfocan en análisis multianuales. En contraste, los evaluadores económicos que aquí se presentan se orientan al análisis de sistemas altamente interconectados, con posibilidad de facilitar un análisis en tiempo real y de implementar herramientas económicas con impactos en el corto plazo (de 15 días a 7 meses). Estas características son las que más se destacan de la herramientas que se desarrollarán en los siguientes apartados.

Típicamente, la evaluación hidroeconómica se apoya en el uso de modelos preexistentes y robustos con la capacidad de describir con un alto grado de confianza el comportamiento de los sistemas a evaluar. En el caso de la gestión de sistemas hídricos a escala de cuenca encontramos que entre los modelos genéricos de **planificación y gestión** de mayor empleo en la actualidad se encuentran el AQUATOOL+ o el WEAP, ambos combinan procesos de simulación y optimización.

AQUATOOL+ (Andreu et al., 1996) es una herramienta de sistema de soporte de la decisión en la gestión de SRH desarrollada, en el contexto del grupo de investigación de Ingeniería de Recursos

Hídricos del Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia. La herramienta está dividida en módulos: SIMGES (modelo para simulación de la gestión de cuencas), GESCAL (evaluación de calidad de agua), OPTIGES (optimización de reparto de recursos), SIMRISK (evaluación de riesgos en la gestión) y EVALHID (evaluación de recursos hídricos). El módulo SIMGES, posibilita el desarrollo de modelo de SRH incorporando elementos de regulación, captación, transporte, consumos y recargas. La simulación se realiza a escala mensual. Por medio del módulo OPTIGES se calcula el reparto óptimo del recurso para un período de tiempo de uno o varios años, sin necesidad de demasiados datos más que conexiones, embalses y demandas.

Por su parte, WEAP (Stockholm Environment Institute's U.S. Center, 1988). Este sistema de evaluación y planificación del agua destaca la incorporación de los siguientes aspectos: enfoque integrado, estructura transparente para la participación de actores involucrados, balance hidrológico de demandas y suministros, simulaciones para variados escenarios hidrológicos y de políticas, interfaz amigable e integración con otros modelos y programas. La metodología de funcionamiento se basa en el desarrollo de una situación base y la posterior creación de escenarios alternativos con el fin de evaluar costos incrementales en las inversiones, cambios en políticas operativas e implicaciones en ofertas y demandas de los recursos asignados. Para un análisis detallado del sistema requiere de mucha información.

En las últimas décadas, y por causa de la incidencia del cambio climático en la disponibilidad de recursos, ha habido un creciente interés por la integración de **aspectos ambientales** en los procesos de toma de decisiones correspondientes a la gestión del recurso hídrico. Desde la planificación hidrológica se han fijado objetivos con miras a lograr el buen estado de las masas de agua, disminuyendo su contaminación y manteniendo caudales mínimos en masas de agua superficiales que posibiliten la permanencia de la biodiversidad.

En cuanto a estimación de emisiones de CO<sub>2</sub>, la información disponible de estudios realizados es menor, las publicaciones analizadas desarrollan estimaciones de emisiones para bombeos de aguas subterráneas, pero no del resto de elementos que pueden componer un sistema de recursos hídricos. Puntualmente, en la publicación "*Groundwater Depletion and Associated CO<sub>2</sub> Emissions in India*" (Mishra et al., 2019), expone una metodología para la estimación de emisiones en donde se considera por un lado la variación de volumen de acuíferos y la concentración de bicarbonatos (relacionada con la liberación de dióxido de carbono a la atmósfera), y por el otro, la emisión de gases de dióxido de carbono relacionada con la energía requerida para los bombeos.

En conclusión, la evaluación hidroeconómica y ambiental de los sistemas son una herramienta indispensable para ofrecer un esquema de trabajo cuantitativo y consistente para los gestores del agua y los procesos de toma de decisiones (Bauer-Gottwein, 2017). Sin embargo, se encuentra que aún hay margen para la implementación de herramientas más versátiles que de desarrollarse en un entorno informático replicable permitan la centralización de conceptos interdisciplinarios y la evaluación en tiempo real del impacto de las medidas de gestión en un sistema de recursos hídricos.



### 3. METODOLOGÍA

---

En el presente numeral, se expone la metodología seguida en el diseño y desarrollo de los evaluadores hidroeconómico y ambiental. Es necesario resaltar, que estas son herramientas que complementan a los desarrollos de simulación y optimización que forman parte del proyecto SIAGES, ya presentado en el apartado 1.2 “CONTEXTO DEL TFM DENTRO DEL PROYECTO SIAGES” (*Ver Ilustración 1*).

El **evaluador hidroeconómico** es capaz de estimar costes de operación y beneficios económicos asociados a la gestión de sistema de recursos hídricos. En la *Ilustración 2*, se presenta el diagrama de flujo en donde se esquematiza la metodología de cálculo adoptada tras realizar una recopilación exhaustiva de técnicas y metodologías más confiables para su análisis. Tras la selección, diferentes técnicas fueron reunidas y programadas en lenguaje Python, generalizadas para permitir su uso en cualquier caso de estudio, y compiladas en una herramienta informática de uso dinámico y flexible. Se debe destacar que los casilleros resaltados en el esquema, representan los resultados del evaluador.

Dentro de un sistema de recursos hídricos son múltiples los componentes que son susceptibles de un análisis hidroeconómico, y que además suponen una influencia significativa en la forma en la que se gestionan los recursos. En este sentido, para el desarrollo de los evaluadores se ha optado por la inclusión exclusiva de aquellos aspectos del sistema de distribución en alta que suelen estar presentes en cualquier sistema de gestión. Bajo esta premisa, en el evaluador hidroeconómico se han incorporado cuatro elementos para la **evaluación de costes** de operación del sistema.

- Impulsiones en el sistema superficial
- Instalaciones Desaladoras de Agua de Mar (IDAM)
- Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR)
- Bombeos subterráneos para suministro de demandas agrarias

Por otra parte, para la **estimación de beneficios netos** en el uso del agua, la aplicación incluye los siguientes elementos:

- Centrales hidroeléctricas fluyentes y a pie de presa
- Producción agrícola en Unidades de Demanda Agraria (UDA)

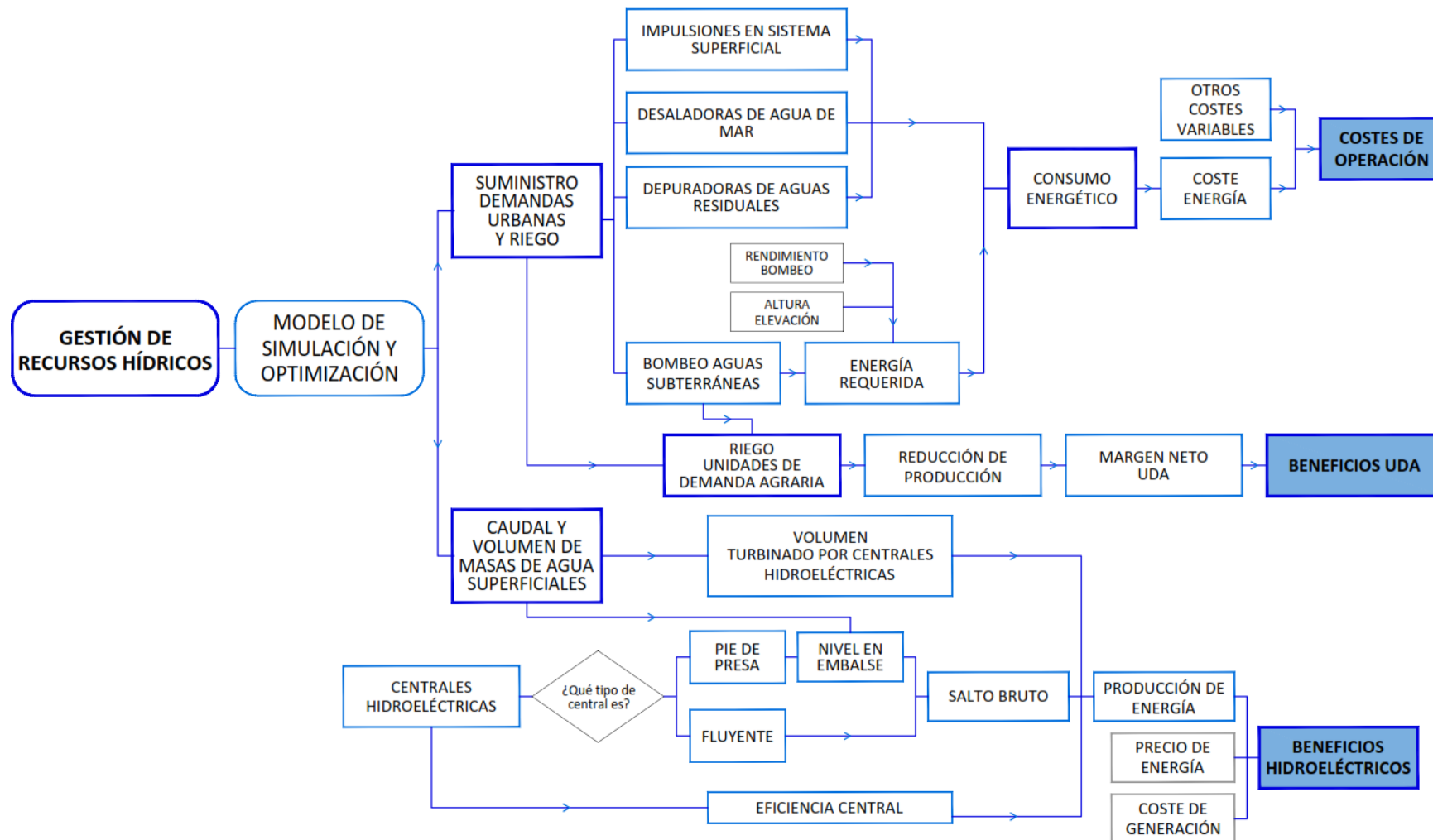


Ilustración 2. Diagrama de flujo evaluador hidroeconómico

Por su parte, el **evaluador ambiental** es un posprocesador capaz de estimar las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera asociadas a la gestión y, a la vez, verificar el cumplimiento de caudales ecológicos en masas de agua superficiales.

Análogamente a lo comentado para el evaluador hidroeconómico, se ha recopilado información sobre diversas técnicas de cálculo de emisiones, optando por una *metodología simplificada* que permite estimar las emisiones en forma proporcional al consumo energético de cada elemento del sistema de recursos hídricos considerado.

Las infraestructuras asociadas a la gestión del recurso que se han incorporado coinciden con los mismos cuatro elementos ya mencionados en el evaluador hidroeconómico, los cuales se listan a continuación:

- Impulsiones en el sistema superficial
- Instalaciones Desaladoras de Agua de Mar (IDAM)
- Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR)
- Bombeos subterráneos para suministro de demandas agrarias

Por otro lado, se ha desarrollado una herramienta capaz de **verificar el cumplimiento de caudales ecológicos** de las masas de aguas superficiales a partir de datos de aportaciones y estado de escasez de la cuenca.

Una vez establecidas las metodologías de cálculo fueron programadas en lenguaje Python, generalizadas para permitir su uso en cualquier caso de estudio, y compiladas en una herramienta informática de uso dinámico y flexible, obteniendo así una herramienta informática integral para la **evaluación ambiental** de un SRH. En la *Ilustración 3* se expone la metodología de cálculo empleada, en donde se han resaltado los casilleros correspondientes a los resultados del evaluador.

Ambos evaluadores se han desarrollado de forma tal que para su funcionamiento requieren de dos tipos de archivos tipo CSV (*comma-separated values UTF-8*) que contienen la información necesaria para la evaluación del sistema: ficheros *dinámicos* y *estáticos*.

Los **ficheros dinámicos** corresponden a aquellos datos de entrada que son actualizados por el usuario antes de la ejecución de cada evaluación, se componen de series temporales asociadas a la asignación del recurso, como por ejemplo caudales, volúmenes embalses o niveles de acuíferos.

Los **ficheros estáticos** contienen detalles que caracterizan a cada uno de los procesos analizados, entre los que se puede citar consumo energético de instalación, coste de energía o caudal mínimo recomendado para cierta masa de agua superficial. Esta información se obtendrá de bibliografía, consultas con expertos o de organismos reguladores involucrados. Se considera que esta caracterización sólo debe ser realizada al inicio de la evaluación, y actualizada únicamente para desarrollar análisis de sensibilidad o cuando estas características cambien significativamente. Será necesaria su calibración y validación para que los resultados que se obtengan sean confiables.

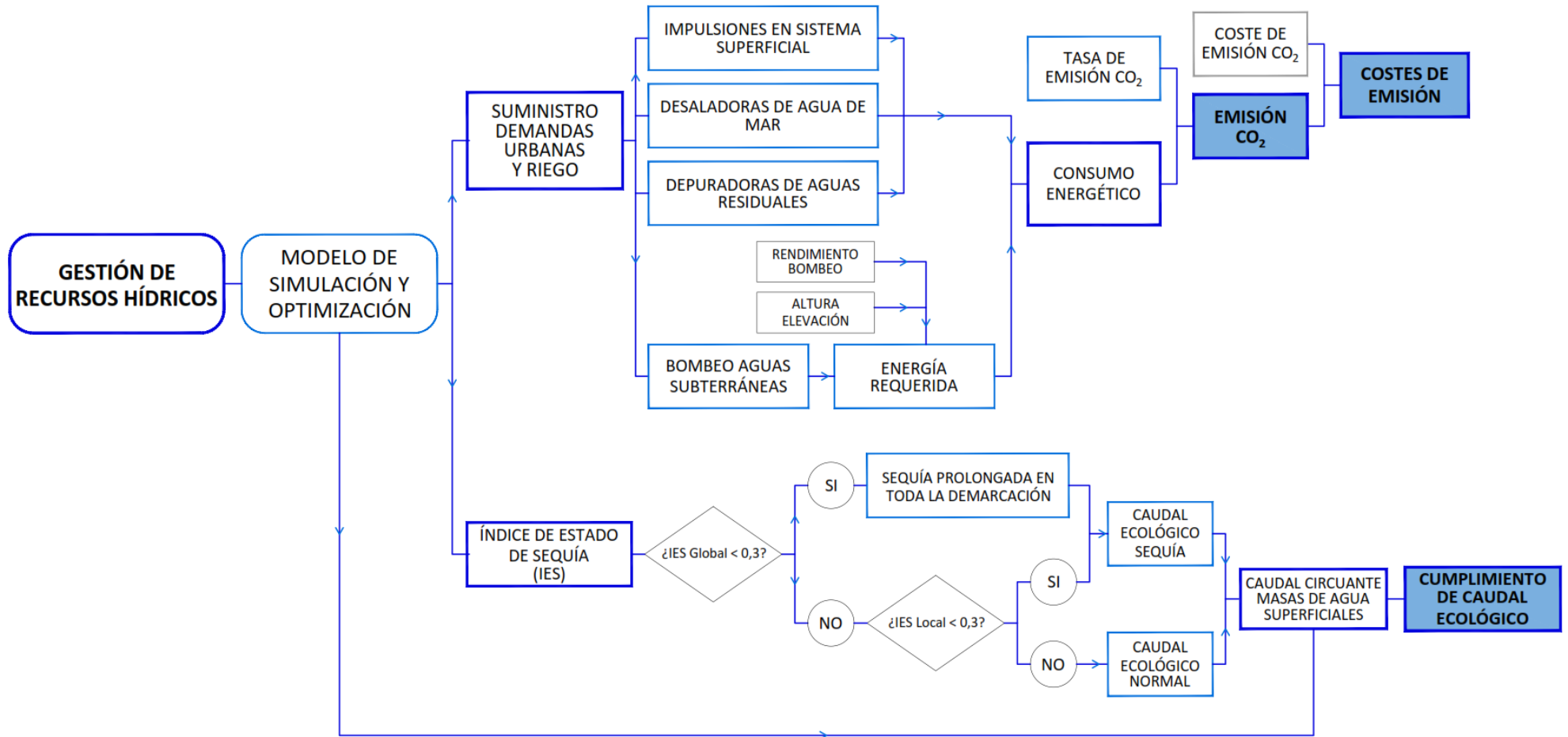


Ilustración 3. Diagrama de flujo evaluador ambiental

## 4. EVALUADOR HIDROECONÓMICO

---

En el presente apartado se hará una descripción detallada de las características y capacidades del evaluador hidroeconómico. El cual fue desarrollado enteramente en lenguaje Python, facilitando así su modulación con cualquier otro tipo de modelo complementario que pueda aportar información adicional a la evaluación hidroeconómica realizada dentro de la herramienta

Para poder obtener una estimación fiable de costes de operación y beneficios asociados a la gestión del recurso hídrico el evaluador precisa como datos de entrada de una multiplicidad de variables que caracterizan al sistema física, hidrológica y económicamente. Esta información es aprovechada por el evaluador a través de una serie de ficheros de datos dinámicos y estáticos.

Los **ficheros dinámicos** contienen todas las series temporales que caracterizan el funcionamiento del sistema en tiempo real, por lo que se actualizarán en cada ejecución de la herramienta previa definición del escenario a evaluar. Dentro de estos ficheros se encuentran, por ejemplo:

- Caudales circulantes por impulsiones superficiales
- Caudales bombeados desde el sistema subterráneo
- Niveles en acuíferos
- Volumen de agua desalada en el sistema
- Volumen turbinado por centrales hidroeléctricas

Los **ficheros internos o estáticos** reúnen información característica de los procesos incluidos en el evaluador que se consideran constantes o con poca variabilidad en el tiempo, y que por ende no requieren de una actualización permanente por parte del usuario. Dentro de esta información es posible encontrar:

- Tasas de consumo energético de estaciones depuradoras de aguas residuales
- Tasas de consumo energético de instalaciones desaladoras de agua de mar
- Coeficientes de rendimiento de los sistemas de bombeo.
- Salto bruto y eficiencia de centrales hidroeléctricas
- Margen neto de Unidades de Demanda Agrarias

Finalmente, con respecto a los resultados que ofrece el evaluador hidroeconómico vale la pena mencionar que este está en capacidad de generar resultados a escalas temporales de tipo diario, semanal y mensual. En la *Tabla 1. Resumen evaluador hidroeconómico* se presenta un resumen de los ficheros empleados por el evaluador, las escalas de trabajo y los resultados que se obtienen.

Tabla 1. Resumen evaluador hidroeconómico

PROCESO	ESCALA DE TRABAJO	FICHERO DINÁMICO	FICHERO ESTÁTICO	RESULTADO EVALUADOR
IMPULSIONES EN EL SISTEMA SUPERFICIAL	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diaria</li> <li>• Semanal</li> <li>• Mensual</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caudal impulsión [m<sup>3</sup>/s]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consumo energético [kWh/m<sup>3</sup>]</li> <li>• Coste de energía [€/kWh]</li> <li>• Otros costes variables unitarios [€/m<sup>3</sup>]</li> </ul>	Costes de operación [€]
INSTALACIONES DESALADORAS DE AGUA DE MAR (IDAM)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diaria</li> <li>• Semanal</li> <li>• Mensual</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caudal IDAM [m<sup>3</sup>/s]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consumo energético [kWh/m<sup>3</sup>]</li> <li>• Coste de energía [€/kWh]</li> <li>• Otros costes variables unitarios [€/m<sup>3</sup>]</li> </ul>	Costes de operación [€]
ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES (EDAR)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diaria</li> <li>• Semanal</li> <li>• Mensual</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caudal EDAR [m<sup>3</sup>/s]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consumo energético [kWh/m<sup>3</sup>]</li> <li>• Coste de energía [€/kWh]</li> <li>• Otros costes variables unitarios [€/m<sup>3</sup>]</li> </ul>	Costes de operación [€]
BOMBEO SUBTERRÁNEOS PARA SUMINISTRO DE DEMANDAS AGRARIAS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diaria</li> <li>• Semanal</li> <li>• Mensual</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caudal bombeo [m<sup>3</sup>/s]</li> <li>• Nivel piezométrico [m]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Coste de energía [€/kWh]</li> <li>• Características pozo de bombeo</li> <li>• Altura terreno UDA [m]</li> <li>• Características modelo aguas subterráneas</li> <li>• Otros costes variables unitarios [€/m<sup>3</sup>]</li> </ul>	Costes de operación [€]
CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diaria</li> <li>• Semanal</li> <li>• Mensual</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Volumen turbinado [m<sup>3</sup>/s]</li> <li>• Nivel de agua en embalses [m]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eficiencia central</li> <li>• Tipología de cada central</li> <li>• Curva cota-volumen de embalse (PIE DE PRESA)</li> <li>• Precio de energía [€/kWh]</li> <li>• Coste de generación [€/kWh]</li> </ul>	Beneficios hidroeléctricos [€]
UNIDADES DE DEMANDA AGRARIA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mensual</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Factor de reducción de producción</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Margen neto de producción en alta [€]</li> </ul>	Beneficios UDAs [€]

A continuación, se detallan las ecuaciones que se han introducido en el evaluador hidroeconómico para cada uno de los procesos citados.

#### 4.1. IMPULSIONES EN EL SISTEMA SUPERFICIAL

El cálculo de los costes variables de operación en impulsiones en el sistema superficial se realiza a partir de las tasas de consumo energético y del precio del mix energético del que se alimentan las instalaciones. La ecuación empleada es la siguiente:

$$\begin{aligned}
 \text{Coste impulsión} &= \text{Caudal} \times 86400 \times \text{Consumo} \times \text{Coste energía} \\
 &+ \text{Caudal} \times \text{Otros costes variables unitarios}
 \end{aligned}
 \tag{Ecuación 1}$$

En donde:

- Coste impulsión, en €/día

- Caudal: caudal impulsado, en m<sup>3</sup>/s
- Consumo energético: en kWh/m<sup>3</sup> característico de cada impulsión
- Coste de energía: en €/kwh
- Otros costes variables unitarios: en €/m<sup>3</sup> (ej. mano de obra operativa, costes de reposición de elementos)

En una ejecución normal del evaluador, el dato de caudal impulsado se extraerá de las series temporales ingresadas por el usuario, mientras que el consumo energético y el coste de energía se extraerán del fichero interno de caracterización hidroeconómica inicial del sistema.

Por defecto, el evaluador tiene incluidos valores de referencia. El consumo energético está fijado entre 0,1 y 0,9 kWh/m<sup>3</sup>, el cual depende de la altura de elevación, de las características de los equipos de bombeo y del estado de las instalaciones en general. El precio del mix energético es variable, pudiendo adoptar como referencia un valor promedio de 0,177 €/kwh.

#### 4.2. INSTALACIONES DESALADORAS DE AGUA DE MAR

El cálculo de los costes variables de operación en desaladoras se realiza considerando la siguiente ecuación:

$$\text{Coste IDAM} = \text{Caudal} \times 86400 \times \text{Consumo} \times \text{Coste energía} + \text{Caudal} \times \text{Otros costes variables unitarios} \quad \text{Ecuación 2}$$

En donde:

- Coste de producción en desaladora en €/día
- Caudal: caudal desalado, en m<sup>3</sup>/s
- Consumo energético: en kWh/m<sup>3</sup> característico de cada instalación desaladora
- Coste de energía: en €/kwh
- Otros costes variables unitarios: en €/m<sup>3</sup> (ej. mano de obra operativa, costes de reposición de elementos, coste de los productos químicos)

De igual forma que en el caso de impulsiones, el caudal desalado proviene las series temporales. El consumo energético y el coste de energía forman parte del fichero interno de caracterización hidroeconómica del sistema. El consumo energético depende de las características y antigüedad de las instalaciones, comúnmente puede variar entre 2,5 y 5 kWh/m<sup>3</sup>.

El coste de la energía es variable y de importante influencia en el coste de operación de las IDAMs. Se ha tomado de referencia un valor de 0,07 €/kWh considerando que se tratan de tarifas especiales para la producción de recursos. Por otro lado, los valores de referencia para costes variables unitarios se encuentran entre 0,1 y 0,2 €/m<sup>3</sup> de agua desalada.

### 4.3. ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES

De forma análoga a los dos procesos descritos precedentemente, el cálculo del coste energético variable asociado a la operación de estaciones depuradoras de aguas residuales (EDAR) se realiza por medio de la ecuación:

$$\text{Coste EDAR} = \text{Caudal} \times 86400 \times \text{Consumo} \times \text{Coste energía} + \text{Caudal} \times \text{Otros costes variables unitarios} \quad \text{Ecuación 3}$$

En donde:

- Coste EDAR en €/día
- Caudal: caudal EDAR, en m<sup>3</sup>/s
- Consumo energético: en kWh/m<sup>3</sup> característico de cada EDAR
- Coste de energía: en €/kwh
- Otros costes variables unitarios: en €/m<sup>3</sup> (ej. mano de obra operativa, costes de reposición de elementos, coste de los productos químicos, retirada y disposición de residuos)

Nuevamente, el caudal de depuradoras se extrae del fichero de entrada a la herramienta, el consumo energético y el coste de energía forman parte del fichero de detalles interno de caracterización hidroeconómica del sistema, junto a demás componentes claves del coste variable, como el coste de los elementos químicos utilizados (por m<sup>3</sup> depurado).

Un valor representativo del consumo energético de estaciones depuradoras de aguas residuales oscila entre 0,35 - 0,80 kWh/m<sup>3</sup> de agua tratada; el coste del mix energético ronda los 0,177 €/kWh y los costes variables fluctúan entre 0,10 – 0,18 €/m<sup>3</sup>.

### 4.4. BOMBEOS SUBTERRÁNEOS PARA SUMINISTRO DE DEMANDAS AGRARIAS

La metodología de cálculo desarrollada para el coste de bombeos subterráneos difiere ligeramente de las precedentes; esto con el objetivo de lograr una estimación más rigurosa y robusta.

El cálculo de los costes se realiza a partir del volumen de agua bombeado por el sistema, de la caracterización de consumos y costes energéticos. La informática que constituye al evaluador requiere de más ficheros entrada, ya que la energía requerida para el suministro varía con la altura de bombeo y el volumen de agua elevado.

El coste de bombeo se puede estimar a partir de la siguiente expresión,

$$\text{Coste bombeo} = \text{Coste energía} \times \text{Energía requerida} \quad \text{Ecuación 4}$$

En donde:

- Coste bombeo en €/día



- Coste energía: es el coste unitario, en €/kWh
- Energía requerida en kWh/m<sup>3</sup>

$$Energía\ requerida = \frac{0,736}{270} \cdot \frac{H}{\eta} \quad Ecuación\ 5$$

- H: altura de elevación, en m
- $\eta$ : rendimiento del conjunto bomba-motor, adimensional.

El valor de altura de elevación se calcula dentro de la herramienta, ya que para su estimación requiere de modelo de hidrología subterránea que brinde niveles piezométricos dinámicos. El valor del coste de energía de referencia considerado es de 0,221 €/kWh.

El grado de detalle de los modelos distribuidos de hidrología subterránea, no permiten determinar con precisión la disminución adicional del nivel freático en las proximidades del pozo debido al flujo radial generado por el bombeo. Por esta razón, en los evaluadores desarrollados se incluyen una serie de correcciones para estimar con mayor grado de detalle la altura de bombeo. Estas correcciones se basaron en el trabajo desarrollado por Pulido-Velázquez (2003), de donde se han extraído las siguientes ecuaciones para estimar la altura de elevación durante los bombeos.

Asumiendo una eficiencia de los pozos de bombeo del 50% (valor que es posible modificar en los evaluadores según cada caso), la expresión para determinar la altura total de elevación propuesta por Harter (2003) es la siguiente:

$$H = (H_{Terreno} - h_{celda}) + 2 \cdot s_{pozo} + P_{descarga} \quad Ecuación\ 6$$

En donde:

- $H_{Terreno}$ : cota de terreno en el punto de observación, en m.
- $h_{celda}$ : nivel freático con respecto al nivel de referencia que proviene del modelo de hidrología subterránea, en m.
- $s_{pozo}$ : descenso por depresión causado por el bombeo en los alrededores del pozo por flujo radial, en m.
- $P_{descarga}$ : presión de descarga adicional requerida a la salida del pozo, en m.

Para el cálculo de los descensos en un pozo se aplica la solución analítica dada por la *ecuación de Thiem* (1906) para régimen estacionario (Freeze y Cherry, 1979), que depende de las características del modelo subterráneo (dimensiones de malla), transmisividad del acuífero, radio efectivo del pozo y caudal bombeado.

$$s_{pozo} = h_{pozo} - h_{celda} = \frac{Q_b}{2 \cdot \pi \cdot T} \cdot \ln \frac{r_{ef}}{r_{pozo}} \quad Ecuación\ 7$$

En donde:

- $Q_b$ : caudal de bombeo en pozo, en  $m^3/día$
- $T$ : transmisividad del acuífero, en  $m^2/día$
- $r_{pozo}$ : radio del pozo, en m.
- $r_{ef}$ : radio efectivo, en m. Define la distancia del centro del pozo a partir de la cual los niveles son igual a  $h_{celda}$ . En caso de que el modelo de hidrología subterránea sea definido por medio de una malla regular de celdas cuadradas, el valor del radio efectivo se puede estimar con la siguiente ecuación.

$$r_{ef} = 0,208 \cdot a \quad \text{Ecuación 8}$$

En donde

- $a$ : dimensión de la malla del modelo subterráneo

#### 4.5. CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Para su estimación, se emplearon ecuaciones propuestas por Andreu y otros, en el manual de usuario del modelo SIMGES en donde se estima la producción de energía a partir del salto bruto medio, del coeficiente global de eficiencia y del volumen turbinado.

$$E = H_m \cdot \mu \cdot V_T \quad \text{Ecuación 9}$$

En donde:

- $H_m$ : salto bruto medio, m
- $\mu$ : coeficiente global de eficiencia, en  $GWh/hm^3.m$ . Se calcula como el producto entre 0,0027222 y el coeficiente adimensional de eficiencia ( $\varepsilon$ )
- $V_T$ : volumen turbinado por mes, en  $hm^3$

La eficiencia de la central hidroeléctrica es función de

- $\eta_T$ : rendimiento de la turbina
- $\eta_G$ : rendimiento del generador
- $\eta_t$ : rendimiento del transformador

Finalmente, el beneficio económico se estima con la siguiente ecuación

$$ben_{gen} = E \cdot (P_R - C_G) \quad \text{Ecuación 10}$$

En donde:

- $E$ : producción de energía, en kWh
- $P_R$ : precio de la energía en régimen especial, en €/kWh
- $C_G$ : coste de generación, en €/kWh

Las características particulares de cada una de las centrales hidroeléctricas, como lo son la eficiencia, el precio de la energía y coste de generación, forman parte del archivo de detalles interno editable incluido en el evaluador. Por defecto el evaluador tiene incluidos valores de referencia donde el coste de generación varía entre 0,055 – 0,06 €/kWh y el precio de la energía en régimen especial es 0,078 €/kWh.

En condiciones normales, el caudal turbinado se extrae del fichero de entrada al evaluador y es un valor dinámico. El salto turbinado difiere según el tipo de central que se esté analizado, ya sea tipo fluyente o de pie de presa. En el primer caso, es un valor estático característico de la central. En cambio, para aquellas ubicadas a pie de presa, se tomará la altura media del embalse entre el valor actual y el correspondiente al período de tiempo anterior. Estas alturas se determinan a partir de la curva cota-volumen característica del embalse asociado.

#### 4.6. UNIDADES DE DEMANDA AGRARIA

Por último, para la estimación de beneficios netos de las unidades de demanda agrarias se toma como punto de partida la información de **Margen Neto de Producción en alta** de cada unidad productiva, que en general es información analizada y publicada por el organismo gestor de cuencas.

La ecuación empleada para la estimación del beneficio neto es:

$$\text{Beneficio UDA} = F_R \times M_N \quad \text{Ecuación 11}$$

En donde:

- Beneficio UDA, en €
- $F_R$ : factor de reducción de producción, adimensional
- $M_N$ : margen neto de producción en alta para cada UDA, en €

En condiciones normales, el factor de reducción de producción se extrae del fichero de entrada al evaluador y es un valor dinámico que estará asociado a condiciones climáticas y cumplimiento de necesidades de riego de las especies cultivadas en las unidades de demanda agrarias. Puntualmente, para el caso de la aplicación dentro del entorno de SIAGES, es posible la estimación (a través del módulo AGRO, M3) de la reducción de la producción de cada unidad de demanda para cada una de las trayectorias futuras para el período estacional, este factor de reducción carece de sentido a corto plazo.

## 5. EVALUADOR AMBIENTAL

---

El evaluador ambiental, se ha desarrollado con la misma metodología que el hidroeconómico. Para su funcionamiento, también requiere de dos tipos de archivos tipo CSV (*comma-separated values UTF-8*) que contienen la información para la evaluación del sistema.

El primer tipo de archivos, **ficheros de entrada**, corresponden a aquellos datos que son actualizados por el usuario antes de la ejecución de cada evaluación, contienen todas las series temporales que caracterizan el funcionamiento del sistema dinámicamente. Dentro de estos ficheros se encuentran:

- Caudales circulantes por impulsiones superficiales
- Caudales bombeados desde el sistema subterráneo
- Niveles en acuíferos
- Volumen de agua desalada en el sistema
- Volumen de agua recuperada por estaciones depuradoras de aguas residuales
- Caudales circulantes en masas de aguas superficiales

Por su parte, el segundo grupo corresponde a **ficheros de detalles internos**, los cuales reúnen información característica de los procesos incluidos en el evaluador, y que por ende no requieren de una actualización constante por parte del usuario. Se considera que esta caracterización de procesos sólo debe ser realizada al inicio de la evaluación, y actualizada únicamente para desarrollar análisis de sensibilidad o cuando estas características cambien significativamente en el sistema. Dentro de esta información se encuentran:

- Tasas de emisiones de CO<sub>2</sub> de estaciones depuradoras de aguas residuales
- Tasas de emisiones de CO<sub>2</sub> de instalaciones desaladoras de agua de mar
- Coeficientes de rendimiento de los sistemas de bombeo.
- Caudales mínimos en condiciones normales y de sequía prolongada que deben cumplir las masas de aguas superficiales

Para la estimación de emisiones de dióxido de carbono [Ton.CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup>] se ha considerado un factor de emisión unitaria vinculado al consumo energético de cada proceso, al cual se le ha asignado un valor económico en €/Ton.CO<sub>2</sub> que posibilita estimar un coste adicional al sistema.

Con respecto a los resultados que ofrece el evaluador ambiental se podrán ajustar a escalas temporales de tipo diario, semanal y mensual según los requerimientos del usuario. En la *Tabla 2* se presenta un resumen de los resultados que es posible obtener a través del evaluador.

Tabla 2. Resumen evaluador ambiental

PROCESO	ESCALA DE TRABAJO	FICHERO DINÁMICO	FICHERO ESTÁTICO	RESULTADO EVALUADOR
<b>IMPULSIONES EN EL SISTEMA SUPERFICIAL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diaria</li> <li>• Semanal</li> <li>• Mensual</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caudal impulsión [m<sup>3</sup>/s]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consumo energético [kWh/m<sup>3</sup>]</li> <li>• Tasa de emisión CO<sub>2</sub> [TonCO<sub>2</sub>/kWh]</li> <li>• Coste emisión CO<sub>2</sub> [€/TonCO<sub>2</sub>]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emisión de CO<sub>2</sub> [TonCO<sub>2</sub>]</li> <li>• Costes de emisión [€]</li> </ul>
<b>INSTALACIONES DESALADORAS DE AGUA DE MAR (IDAM)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diaria</li> <li>• Semanal</li> <li>• Mensual</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caudal IDAM [m<sup>3</sup>/s]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consumo energético [kWh/m<sup>3</sup>]</li> <li>• Tasa de emisión CO<sub>2</sub> [TonCO<sub>2</sub>/kWh]</li> <li>• Coste emisión CO<sub>2</sub> [€/TonCO<sub>2</sub>]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emisión de CO<sub>2</sub> [TonCO<sub>2</sub>]</li> <li>• Costes de emisión [€]</li> </ul>
<b>ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES (EDAR)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diaria</li> <li>• Semanal</li> <li>• Mensual</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caudal EDAR [m<sup>3</sup>/s]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consumo energético [kWh/m<sup>3</sup>]</li> <li>• Tasa de emisión CO<sub>2</sub> [TonCO<sub>2</sub>/kWh]</li> <li>• Coste emisión CO<sub>2</sub> [€/TonCO<sub>2</sub>]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emisión de CO<sub>2</sub> [TonCO<sub>2</sub>]</li> <li>• Costes de emisión [€]</li> </ul>
<b>BOMBEO SUBTERRÁNEOS PARA SUMINISTRO DE DEMANDAS AGRARIAS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diaria</li> <li>• Semanal</li> <li>• Mensual</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caudal bombeo [m<sup>3</sup>/s]</li> <li>• Nivel piezométrico [m]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tasa de emisión CO<sub>2</sub> [TonCO<sub>2</sub>/kWh]</li> <li>• Coste emisión CO<sub>2</sub> [€/TonCO<sub>2</sub>]</li> <li>• Características pozo de bombeo</li> <li>• Altura terreno UDA [m]</li> <li>• Características modelo aguas subterráneas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emisión de CO<sub>2</sub> [TonCO<sub>2</sub>]</li> <li>• Costes de emisión [€]</li> </ul>
<b>VERIFICACIÓN DE CUMPLIMIENTO DE CAUDAL ECOLÓGICO</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Semanal</li> <li>• Mensual</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caudal masa superficial [m<sup>3</sup>/s]</li> <li>• Índice de estado de sequía</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caudal mínimo que debe cumplir cada masa de agua [m<sup>3</sup>/s]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Cantidad de veces que no se cumple con caudal ecológico</li> </ul>

A continuación, se detallan las ecuaciones que se han introducido en el evaluador hidroeconómico para cada uno de los procesos.

### 5.1. IMPULSIONES EN EL SISTEMA SUPERFICIAL

El cálculo de emisiones por impulsiones se realiza considerando la siguiente ecuación:

$$Emisión\ impulsión = Q \times 86400 \times CE \times Tasa\ emisión \quad Ecuación\ 12$$

En donde:

- Emisión impulsión, en TonCO<sub>2</sub>/día
- $Q$ : caudal impulsado, en m<sup>3</sup>/s
- $CE$ : Consumo energético, en kWh/m<sup>3</sup> característico de cada impulsión, detallado en el apartado correspondiente al evaluador hidroeconómico.
- Tasa emisión de CO<sub>2</sub>, en TonCO<sub>2</sub>/kWh según fuente de energía usada

De manera análoga al funcionamiento del evaluador económico, el dato de caudal impulsado se extraerá de las series temporales ingresadas por el usuario, mientras que el consumo energético y la tasa de emisión se extraerán del fichero interno de caracterización ambiental inicial del sistema.

Por defecto, el evaluador tiene incluidos valores de referencia. El consumo energético está fijado entre 0,1 y 0,9 kWh/m<sup>3</sup>, el cual depende de la altura de elevación, de las características de los equipos de bombeo y del estado de las instalaciones en general.

El factor de emisión de CO<sub>2</sub> asociado al consumo energético se ha fijado 273 gCO<sub>2</sub>eq/kWh, el cual corresponde al valor medio de los datos publicado por la red eléctrica española de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia (CNMC) para el año 2022.

## 5.2. INSTALACIONES DESALADORAS DE AGUA DE MAR

El cálculo de emisiones por desaladoras se realiza considerando la siguiente ecuación:

$$Emisión\ IDAM = Q \times 86400 \times CE \times Tasa\ emisión \quad Ecuación\ 13$$

En donde:

- Emisión IDAM, en TonCO<sub>2</sub>/día
- $Q$ : caudal desaladoras de agua de mar, en m<sup>3</sup>/s
- $CE$ : Consumo energético, en kWh/m<sup>3</sup> característico de cada desaladora, detallado en apartado correspondiente en evaluador hidroeconómico.
- Tasa emisión de CO<sub>2</sub>, en TonCO<sub>2</sub>/kWh característica de cada instalación desaladora, según la fuente/s de energía empleada

De igual forma que en el caso de impulsiones, el caudal desalado proviene las series temporales. El consumo energético y la tasa de emisión forman parte del fichero interno de caracterización ambiental del sistema.

El consumo energético depende de la características y antigüedad de las instalaciones, comúnmente puede variar entre 2,5 y 5 kWh/m<sup>3</sup>. El valor de referencia de la tasa de emisión se ha fijado en 273 gCO<sub>2</sub>eq/kWh, según lo publicado por CNMC.

## 5.3. ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES

De forma análoga a los dos procesos descritos precedentemente, el cálculo de emisiones por estaciones depuradoras de aguas residuales se realiza por medio de la ecuación:

$$Emisión\ EDAR = Q \times 86400 \times CE \times Tasa\ emisión \quad Ecuación\ 14$$

En donde:

- Emisión EDAR, en TonCO<sub>2</sub>/día
- $Q$ : caudal Estación Depuradora de Aguas Residuales, en m<sup>3</sup>/s
- $CE$ : Consumo energético, en kWh/m<sup>3</sup> característico de cada desaladora detallado en apartado correspondiente en evaluador hidroeconómico.
- Tasa emisión de CO<sub>2</sub>, TonCO<sub>2</sub>/kWh según fuente de energía usada.

Nuevamente, el caudal de depuradoras se extrae del fichero de entrada a la herramienta, el consumo energético y la tasa de emisión forman parte del fichero de detalles interno de caracterización ambiental del sistema.

Un valor representativo del consumo energético de estaciones depuradoras de aguas residuales ronda entre 0,35 - 0,80 kWh/m<sup>3</sup> y la tasa de emisión se ha fijado en 273 gCO<sub>2</sub>eq/kWh que corresponde al valor medio publicado por CNMC en el año 2022.

#### 5.4. BOMBEO SUBTERRÁNEOS PARA SUMINISTRO DE DEMANDAS AGRARIAS

En cuanto a las emisiones causadas por bombeos de aguas subterráneas, para su estimación se requiere determinar el consumo energético, el cual es función de la altura de bombeo y el volumen de agua elevado como se ha desarrollado en el *Apartado 4.4 "BOMBEO SUBTERRÁNEOS PARA SUMINISTRO DE DEMANDAS AGRARIAS"*

Las emisiones de dióxido de carbono por bombeos se pueden estimar a partir de la siguiente expresión,

$$\text{Emisión bombeo} = \text{Tasa emisión} \times \text{Energía requerida} \quad \text{Ecuación 15}$$

En donde:

- Emisión bombeo, en TonCO<sub>2</sub>/día
- Energía requerida, en kWh/m<sup>3</sup>
- Tasa emisión de CO<sub>2</sub>, en TonCO<sub>2</sub>/kWh característico de cada bombeo

En el fichero de detalles internos se incluye las constantes necesarias para la estimación del consumo energético, como por ejemplo rendimiento del equipo de bombeo o características del modelo de agua subterránea ya detallado en el *Apartado 4.4.*, y, también, la tasa de emisión de caracterización ambiental del sistema. El valor representativo se ha fijado en 273 gCO<sub>2</sub>eq/kWh que corresponde al valor publicado por CNMC del año 2022.

Adicionalmente, la herramienta permite el cálculo del coste de emisión, al multiplicar las toneladas de CO<sub>2</sub> estimadas por el medio del evaluador, con valor económico del CO<sub>2</sub> vigente en el mercado. La ecuación empleada es la misma para los cuatro elementos del sistema de recursos

hídricos incorporados, por simplicidad se expresa una única vez con el fin de no presentar información redundante.

$$\text{Costes emisiones} = \text{Emisión impulsión} \times \text{Coste emisión CO}_2 \quad \text{Ecuación 16}$$

- Coste de emisión CO<sub>2</sub>, en €/TonCO<sub>2</sub>. Valor publicado mensualmente por el sistema europeo de negociación de CO<sub>2</sub>.

Se ha prefijado el valor promedio correspondiente al mismo año publicado por el Sistema Europeo de negociación de CO<sub>2</sub> 53,55€/TonCO<sub>2</sub>.

## 5.5. VERIFICACIÓN DE CUMPLIMIENTO DE CAUDAL ECOLÓGICO

La verificación de cumplimiento de caudales mínimos en las masas de aguas superficiales requiere de tres ficheros con información en formato CSV. Por un lado, como fichero de detalles de baja actualización se encuentran los caudales mínimos que se deben cumplir en las masas de aguas superficiales, información que generalmente se incluye en Planes Hidrológicos y/o publicaciones del organismo gestor.

Por otro lado, serán necesarios ficheros de entradas actualizados previos a la ejecución del evaluador. Éstos contienen series temporales de aportaciones en masas de agua e índices de estado se sequía que permitan identificar en qué estado se encuentra la cuenca, ya que los caudales mínimos publicados por los organismos gestores difieren para condiciones normales o en sequía prolongada.

Finalmente, la verificación de cumplimiento consiste en una comparación lógica en donde el caudal circulante por la masa de agua superficial en cada período de tiempo supera al caudal mínimo prefijado.

El evaluador brindará como resultado la cantidad de veces que no se cumple con el caudal ecológico para la serie temporal que se esté analizando.



## 6. CASO DE ESTUDIO: DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL SEGURA

En el Real Decreto 125/2007, se han establecido las limitaciones territoriales de las demarcaciones hidrográficas dentro del territorio español, entre las que se encuentra la Demarcación Hidrográfica del Segura (DHS) objeto de estudio en el presente trabajo académico.

En la memoria del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura (PHDS 2022-27), se describe que *“La DHS comprende el territorio de la cuenca hidrográfica del río Segura, desde su nacimiento en la provincia de Jaén (Andalucía), hasta su desembocadura al Mar Mediterráneo en Guardamar de Segura (Alicante), así como sus afluentes (principalmente los ríos Taibilla, Mundo y Guadalentín), la masa de agua de agua de transición de Las Lagunas de la Mata y Torrevieja, las masas de agua costeras entre las cuales destaca por su importancia internacional el Mar Menor, y numerosas ramblas tales como las del Judío, Moro, y Albuñón, esta última, tributaria del referido Mar Menor, no estando por tanto conectada con el río Segura”*.

En la *lustración 4*, se expone la ubicación de la Cuenca Hidrográfica del Segura dentro del territorio español. Comprende la provincia completa de Murcia, este de Almería, este de Jaén, sur de Albacete y oeste de Alicante.

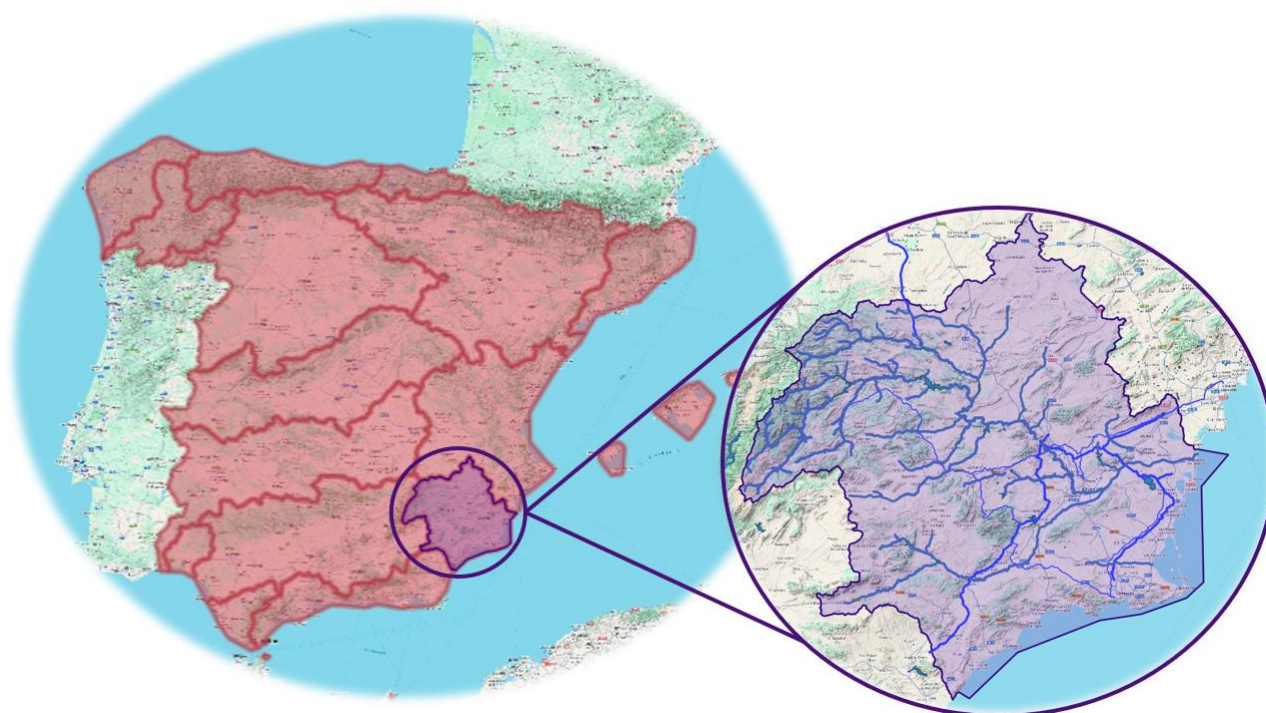


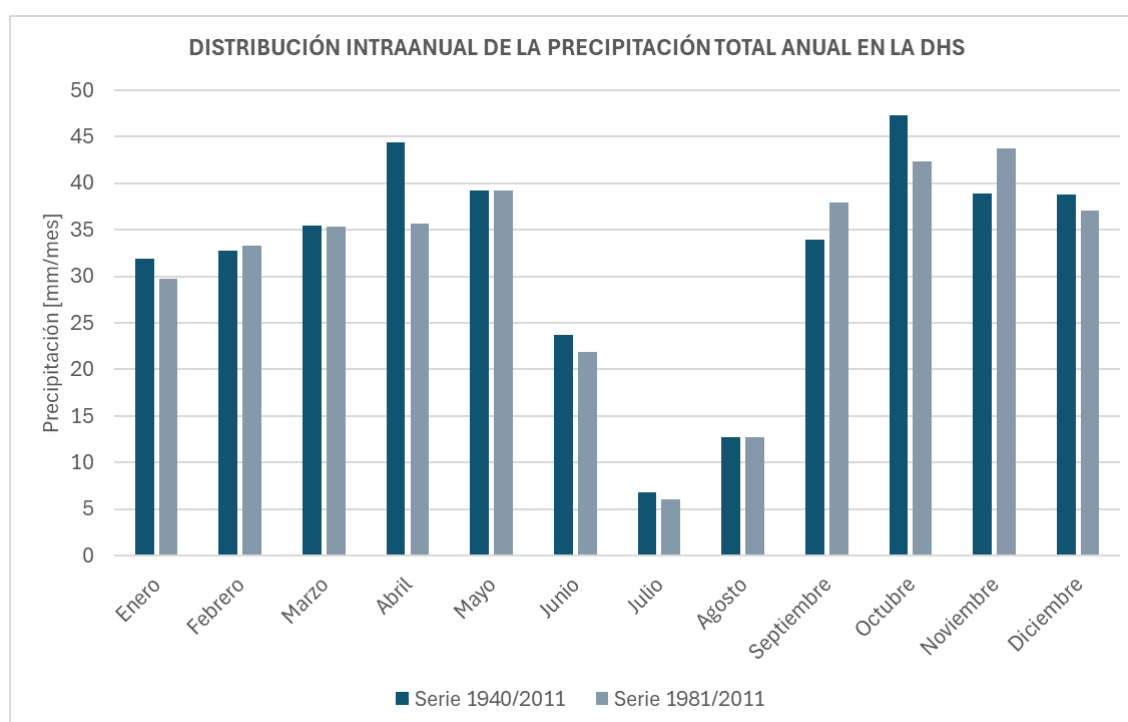
Ilustración 4. Ubicación Demarcación Hidrográfica del Segura dentro de la península Ibérica.  
Elaborada partir de información CHS y cartografía base QGIS.

La Demarcación Hidrográfica del Segura alcanza una extensión total de 20.234 km<sup>2</sup>, considerando tanto aguas costeras como de transición, de las cuales 19.025 km<sup>3</sup> corresponden a la superficie continental.

El clima de la región es mediterráneo semiárido, caracterizado por extensos períodos de sequía alternados con lluvias moderadas a fuertes de corta duración, lo que la hace susceptible a sufrir inundaciones repentinas. La mayor parte de las precipitaciones se concentran en los meses de otoño y primavera, siendo los meses de verano los más secos, como se aprecia en el *Gráfico 1*. La media anual oscila entre 300 y 400 milímetros.

Topográficamente la cuenca del Segura es muy variada, compuesta por zonas montañosas en la cabecera y extensas llanuras en las proximidades a la desembocadura. Las mayores precipitaciones se registran en la zona montañosa del noroeste superando los 1000mm/año. En cambio, al sur de la demarcación el volumen medio de precipitaciones es del orden de 200mm/año o incluso inferior.

La Demarcación Hidrográfica del Segura es conocida por su desequilibrio entre la oferta (1615hm<sup>3</sup>/año) y la demanda (1805 hm<sup>3</sup>/año) de agua (PHDS 2022/27, horizonte 2021). Esto se debe a escasez natural de recursos hídricos, aumento del consumo y mutaciones cualitativas que han afectado a la mayoría de los usos desde la segunda mitad del Siglo XX, (Morote et al., 2020).



*Gráfico 1.* Distribución intraanual de la precipitación total anual en la DHS.  
Fuente: Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura 2015-2021

Desde el punto de vista fluvial, la red hidrográfica de la DHS está compuesta por el río Segura y sus afluentes, numerosas ramblas efímeras de respuesta irregular y torrencial, y una gran cantidad de arroyos pequeños de poco caudal e intermitente en las zonas de cabecera.

Según el Plan Hidrológico de la Demarcación del Segura (2021), se identifican 114 **masas de aguas superficiales**, las cuales se categorizan en: ríos (77), lagos (19), aguas de transición (1) y aguas costeras (17). En la *Ilustración 5*, se han representado las masas de aguas superficiales más relevantes que componen la Demarcación Hidrográfica del Segura.

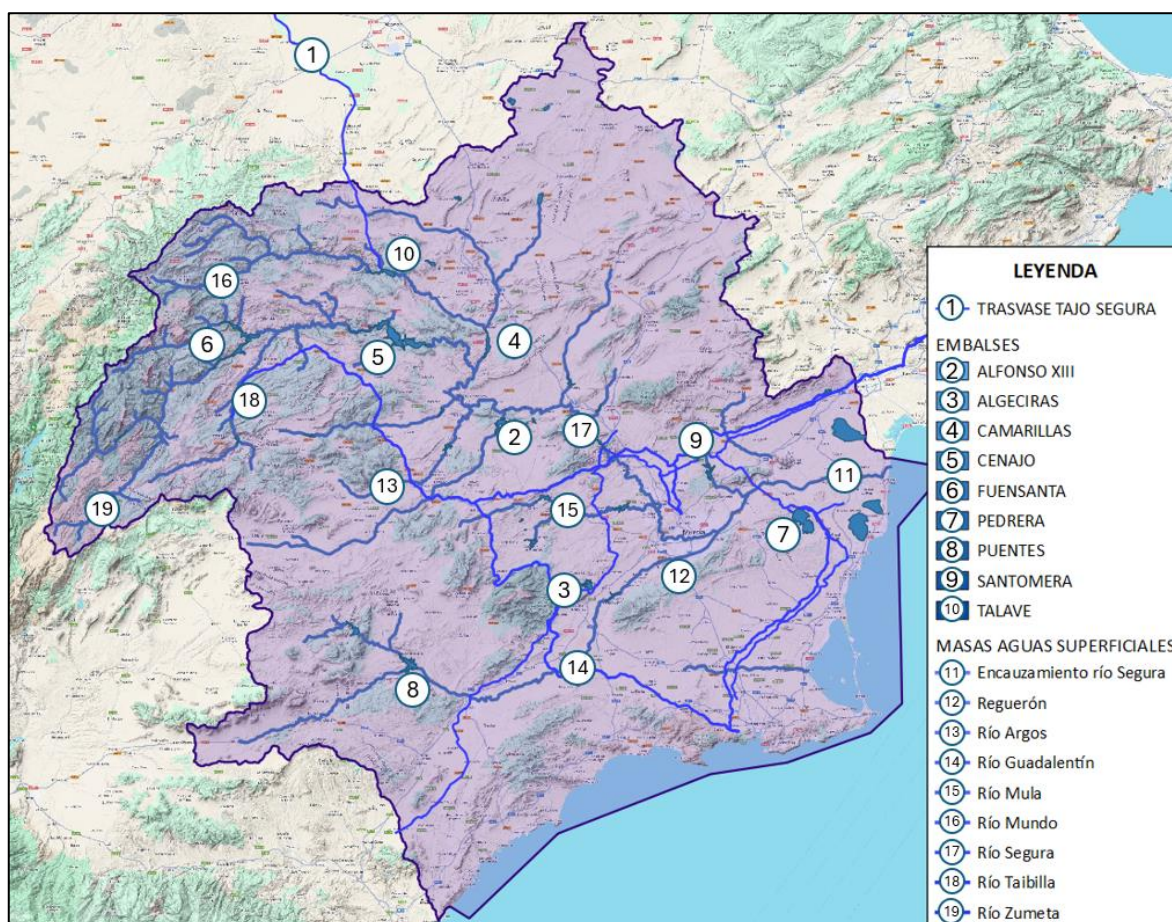


Ilustración 5. Identificación de masas de aguas superficiales Cuenca del Segura.  
Elaborada partir de información CHS y cartografía base QGIS.

La DHS cuenta con recursos superficiales procedentes de otras demarcaciones, provenientes de la cuenca alta del Tajo “Trasvase Tajo-Segura” y de la cuenca del Guadalquivir “Trasvase Negratín-Almanzora”, en menor medida transferencias procedentes del Júcar-Vinalopó. De estos tres, el **Tajo-Segura** es el más importante, ya que se emplea para el abastecimiento de la mayor parte de la población de la demarcación y aporta aproximadamente el 90% de los recursos totales transferidos que se reciben en año medio para riego, según lo expresado en el PHDS 2022/27.

El volumen trasvasado anualmente por medio de acueducto Tajo-Segura está reglamentado por la Ley 52/1980 desde que comenzó su operación. En dicha Ley, se concede el derecho a la utilización de las obras del trasvase y postrasvase a dos usos principales: agricultura de regadío (400 hm<sup>3</sup>/año) y abastecimiento doméstico e industrial del sureste (110 hm<sup>3</sup>/año). Según la memoria del PHDS (2021), luego de 40 años de su puesta en marcha, los volúmenes trasvasados siempre han sido menores a los reglamentados por la Ley.

El funcionamiento del ATS está directamente relacionado con las aportaciones y a la disponibilidad de recursos en los embalses Entrepeñas y Buendía, ubicados en la cabecera del Tajo. En las reglas de explotación se establece que para volúmenes inferiores a 400 hm<sup>3</sup>, no se realizaran trasvases, como ha ocurrido en los meses de julio de 2017 y marzo de 2018 (Memoria PHDS 2022/27, 2021). El volumen mínimo de no trasvase en la nueva normativa más conservadora, se ha incrementado en el año 2013, ya que, anteriormente, en el Plan aprobado en 1998 este volumen era de 240hm<sup>3</sup>.

Para el ciclo de planificación vigente (2022/27), la DHS ha simulado la aportación del trasvase aplicando las reglas de explotación actuales, obteniendo una aportación media del período 1980/81 a 2017/18 de 295 hm<sup>3</sup>/año, de los cuales 197 hm<sup>3</sup>/año son destinados a regadíos y los 98 hm<sup>3</sup>/año restantes a abastecimiento urbano.

Es necesario mencionar que, desde su inauguración en 1979, el Acueducto Tajo-Segura se ha convertido en una de las infraestructuras hidráulicas con el mayor número de **conflictos políticos, ambientales, sociales y económicos** en España (Morote et al., 2020).

- Políticamente, el ATS es cuestionado por las comunidades autónomas donantes que expresan que no hay suficiente agua en las cabeceras del Tajo. Por su parte, la cuenca receptora, defiende la infraestructura por ser de vital importancia para el desarrollo socioeconómico de la región.
- Las tensiones sociales alrededor del ATS han llevado a la creación de numerosas organizaciones y plataformas, tanto a favor como en contra, desde que comenzó el funcionamiento. Se han realizado numerosas manifestaciones, sobre todo en épocas de sequías en la cuenca donante en contra del trasvase por la percepción de escasez de agua, y en la cuenca receptora para demostrar la necesidad de recursos para mantener la productividad y empleos en el sector agrario, además de la justificación de que los aportes se realizan cuando hay excesos en los embalses de cabecera.
- Por su parte, ecologistas de la cuenca donante se oponen al trasvase por los daños ambientales que genera. En cambio, los ambientalistas y principales usuarios del ATS argumentan que el cierre del acueducto implicaría una mayor explotación de aguas subterráneas, provocando el empobrecimiento de ecosistemas, reduciendo su biodiversidad y perdiendo la capacidad de regeneración.

- Finalmente, las controversias económicas del trasvase se encuentran que en la cuenca donante se ven afectadas las actividades turísticas entorno a los embalses, con las consecuentes pérdidas económicas. En cambio, se garantiza el suministro para riegos de actividades agrarias de mayor producción hortícola del país.

La cuenca del Segura cuenta, además, con un importante aporte de recursos no convencionales, entre los que se destaca agua desalinizada y reutilizada. La DHS cuenta con capacidad de producción de **agua desalinizada** de 334 hm<sup>3</sup>/año, pero nunca se ha alcanzado este volumen debido al elevado coste de producción. A grandes rasgos, el precio del agua trasvasada es 0,09 €/m<sup>3</sup> frente a 0,60 €/m<sup>3</sup> del agua desalada y el consumo energético es 1,11 kWh/m<sup>3</sup> frente a 4,50 kWh/m<sup>3</sup>. En el horizonte 2021 planteado en el PHDS 2022/27, los recursos desalinizados se estimaron en 305 hm<sup>3</sup>/año, de los que 224 hm<sup>3</sup>/año corresponden a regadíos y 81 hm<sup>3</sup>/año a uso urbano, industrial y de servicios.

En cuanto a la **reutilización** de aguas urbanas, se aprovecha de manera directa (se utiliza directamente sin incorporarse al dominio público hidráulico) e indirectamente (se vierte en los cursos de agua y se diluyen con caudal circulante). En el PHDS 2022/27, se estima que para el horizonte 2021 el volumen de agua tratada por EDARs municipales se aproxime a 145,6 hm<sup>3</sup>/año, se los cuales se reutiliza en forma directa 87,7 hm<sup>3</sup>/año. Al sumar los recursos tratados por EDARs privadas, el volumen reutilizado asciende a 90 hm<sup>3</sup>/año y el de reutilización indirecta a 47,7 hm<sup>3</sup>/año.

Otra cuestión que deben cumplir los regímenes hidrológicos de las masas de agua superficiales son objetivos ambientales, motivo por el cual en el PHDS se definen e implementan **caudales ecológicos** con el fin de impedir su deterioro como consecuencia de acciones antropogénicas o lograr su recuperación, en caso de ser necesario. Las acciones que se destacan por influir negativamente en los cauces son extracciones, presiones morfológicas transversales al cauce, cambios en el régimen, entre otras.

En la DHS se han definido e implementado caudales ecológicos que deben cumplir las masas de aguas superficiales para garantizar el hábitat para las especies de flora y fauna ligadas al medio hídrico. En el presente estudio académico, se ha planteado una metodología para evaluar el cumplimiento de tales caudales ecológicos incluida en el evaluador ambiental presentado en el apartado 5.5 “**VERIFICACIÓN DE CUMPLIMIENTO DE CAUDAL ECOLÓGICO**”.

El sistema hidrográfico del Segura está compuesto, además, por 63 **masas de agua subterráneas** (Ver *Ilustración 6*), de mediana y pequeña extensión, con estructuras geológicas complejas, según lo mencionado en el PHDS. Tales masas de agua cumplen un rol esencial en la demarcación, ya sea por ser caudal base de muchos ecosistemas y masas de agua superficial, como también por su uso en abastecimiento de demandas.

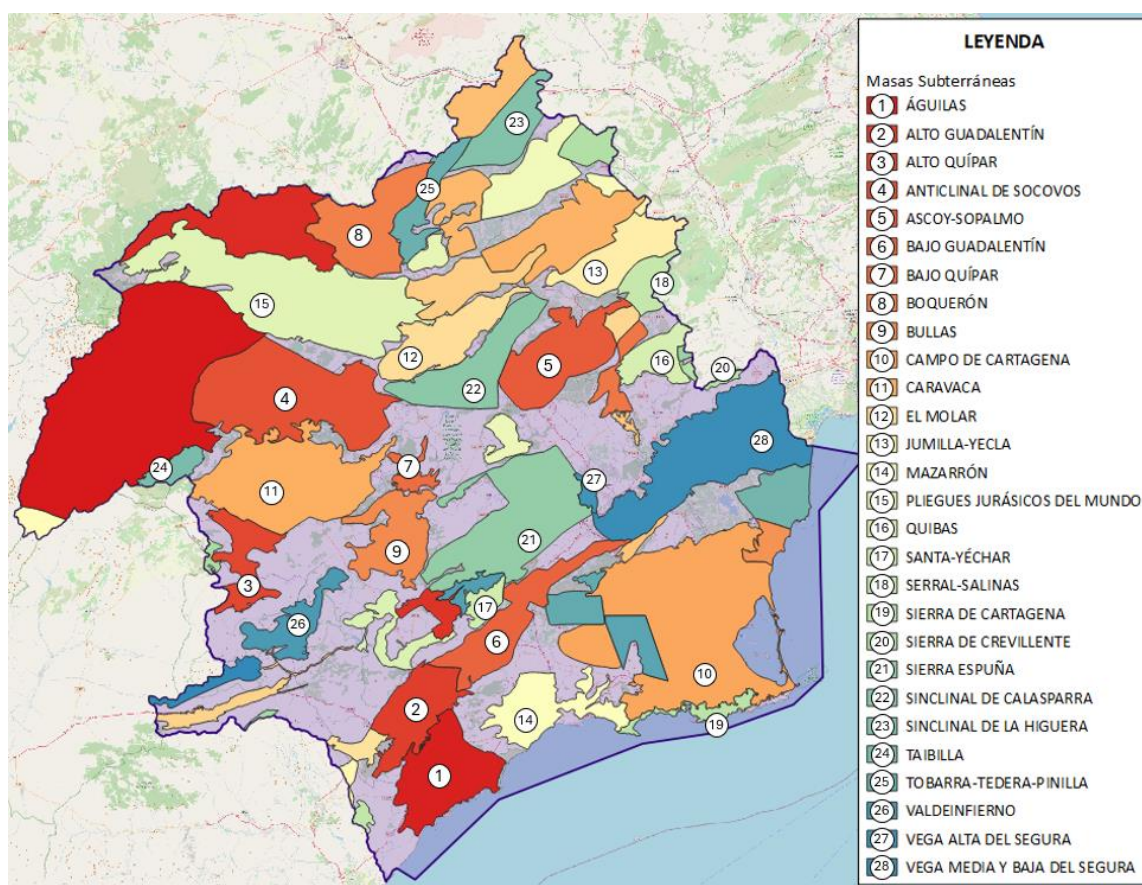


Ilustración 6. Identificación de masas de aguas subterráneas Cuenca del Segura.  
Elaborada partir de información CHS y cartografía base QGIS.

Es necesario mencionar, que la sobreexplotación de las masas de agua subterráneas es uno de los principales problemas de la cuenca. En la DHS se concentra la mayor parte de sobreexplotación en España, motivada por las numerosas unidades de demanda agrarias que se han instalado en el sector ya desde los años 60. Según la memoria del PHDS 2022/27, el volumen máximo anual de aprovechamiento registrado alcanza los 695 hm<sup>3</sup>/año, repartidos entre aprovechamientos de manantiales (60,5 hm<sup>3</sup>/año) y extracciones o pozos y sondeos (634 hm<sup>3</sup>/año).

Este uso intensivo de aguas subterráneas trajo como consecuencias descenso de niveles piezométricos, lo cual ha ocasionado la descarga de fuentes y manantiales, inversión se sentido en relaciones río-acuífero e intrusión de agua salina en acuíferos costeros, afectando ecosistemas y la calidad de aguas subterráneas. En el PHDS 2022/27, se menciona que se han detectado 39 masas de aguas subterráneas no alcanzan el buen estado cuantitativo y 21 no presentan buen estado químico. Como se ha mencionado anteriormente, esta situación se ha visto beneficiada con la puesta en funcionamiento del Acueducto Tajo-Segura en los años 80.

La forma de explotación del sistema del Segura se caracteriza por su **gestión integral**, combinando recursos superficiales (propios, trasvasados, azarbes), subterráneos, depurados y desalinizados en un único sistema de explotación que contempla todas las infraestructuras hidráulicas, incorporando

reglas de explotación para determinar las disponibilidades y déficits asociadas a las distintas unidades de demanda urbanas, industriales, recreativas o agrarias .

Según lo mencionado en la memoria del PHDS 2022/27 (2021), *“La consideración de la cuenca del Segura como un único sistema de explotación se encuentra ya recogido en el Plan Hidrológico de Cuenca de 1998, aprobado por Real Decreto 1664/1998 de 24 de julio”*.

El PHDS 2022/27 establece que el sistema único de explotación está compuesto por:

- El río Segura y sus afluentes
- Red de abastecimiento de Mancomunidad de Canales del Taibilla
- Red de canales e impulsiones del postravase de Acueducto Tajo-Segura
- Red de infraestructuras alrededor de captaciones de agua subterránea
- Instalaciones de desalinización de agua de mar y redes de distribución.

Todos estos elementos se han incorporado en los evaluadores hidroeconómicos y ambientales desarrollados en el presente estudio académico y se describirán en el Capítulo 7 *“ELEMENTOS DEL SISTEMA DE RECURSOS HÍDRICOS*

En cuanto a las demandas en la DHS, según lo publicado en el PHDS 2022/27, actualmente alcanzan unos 1695,7 hm<sup>3</sup> anuales, de los cuales un 85% está asociado al regadío (1476,3 hm<sup>3</sup>/año) y un 11,5% a abastecimiento urbano (199,6 hm<sup>3</sup>/año). El 3,5% restante se distribuyen en ganadería, ocio y turismo e industrias no conectadas a redes de abastecimiento.

El PHDS 2022/27, en el Anejo 06 *“Sistemas de explotación y balances”*, establece el siguiente orden de preferencia asignado a las tomas de las demandas:

- Abastecimiento urbano
- Demandas medioambientales
- Regadío tradicional
- Otros regadíos
- Demanda industrial (no conectada)
- Demanda para riego de campos de golf

En la tabla siguiente, extraída de la memoria del PHDS 2022/27, se presenta de manera resumida la cuantificación de demandas y recursos de la DH del Segura.

Tabla 3. Síntesis de asignaciones y reservas por usos (horizonte 2027) para el sistema de explotación único de la DHS.  
Fuente: Tabla 33 - Memoria PHDS 2022/27 (2021)

Uso	Demanda [hm <sup>3</sup> /año]	Asignaciones del PHDS 2022/27 [hm <sup>3</sup> /año]								Reservas PHDS 2022/27 [hm <sup>3</sup> /año]
		Recursos superficiales propios	Azarbes	Reutilización directa	Reutilización indirecta	Subterráneas renovables	Desalinización	ATS	Trasvase Negratín	
<b>Agrario (regadío y ganadería)</b>	1526	367	61	91	44	215 (*)	255	197	17	4,6 + 60 (**)
<b>Urbano</b>	258	64				17	143	98		
<b>Industrial no conectado, ocio y turismo</b>	20			5		10	4			
<b>TOTAL</b>	<b>1805</b>	<b>431</b>	<b>61</b>	<b>96</b>	<b>44</b>	<b>242</b>	<b>402</b>	<b>295</b>	<b>17</b>	<b>64,6</b>

(\*) Más los recursos alumbrados por infiltración del Túnel Talave

(\*\*) Más 60 procedentes de ampliación de desalinización

Es necesario observar que los valores correspondientes a los trasvases ATS y Negratín representan valores medios. En la información publicada en el PHDS 2022/27, considera asignaciones máximas para el ATS 510 hm<sup>3</sup>/año (400 hm<sup>3</sup>/año usos agrarios y 110 hm<sup>3</sup>/año urbanos) y Negratín 21 hm<sup>3</sup>/año (uso agrario).

En la tabla se aprecia con claridad que el mayor uso de recursos de toda la demarcación está asociado al regadío y ganadería, representando el 85% del total. También, se destaca la importancia de los recursos trasvasados y generados a partir de desalación, ya que sumados alcanzan el 44% de recursos disponibles en la DHS para repartir entre las correspondientes demandas. Lo mencionado, deja en evidencia lo imprescindible que resulta que la gestión de recursos sea altamente optimizada en la demarcación en estudio.

Como se pudo observar en la rigurosa descripción del caso de estudio seleccionado para la validación de los evaluadores Hidroeconómicos, el sistema de la cuenca del Segura es altamente complejo, con una interconectividad a lo largo del territorio entre las diversas fuentes y demandas del recurso que complejizan una evaluación hidroeconómica y ambiental. Por ello, se considera que el caso de estudio es idóneo para validar el desempeño de los evaluadores aquí desarrollados a la hora de centralizar la información proveniente de sistemas complejos.



## 7. ELEMENTOS DEL SISTEMA DE RECURSOS HÍDRICOS

---

Tras presentar las metodologías de cálculo empleadas en los evaluadores y el contexto del caso de estudio, se presentará a continuación con mayor detalle los elementos del SRH que se han considerado en el presente TFM.

El primer paso a la hora de utilizar los evaluadores en un caso de estudio concreto es el de identificar aquellos elementos que intervienen en la gestión de recursos hídricos del sistema y que a su vez son representativos de los principales costes operacionales y beneficios del sistema, incorporando, además, las consecuentes emisiones de CO<sub>2</sub> que se emiten a la atmósfera.

Para el caso particular de la cuenca del Río Segura y con relación a los **costes y emisiones**, se han considerado los consumos energéticos asociados a las impulsiones en el sistema superficial del Acueducto Tajo Segura, las principales instalaciones desaladoras de agua de mar (IDAM), las estaciones depuradoras de aguas residuales (EDARs), y los bombeos subterráneos para suministro de demandas agrarias. Por otra parte, para considerar los **beneficios**, se han incluido en el análisis a las centrales hidroeléctricas y la producción agrícola de las unidades de demanda agraria.

A continuación, se describe con más detalle cada uno de los elementos mencionados, así como la caracterización económica y de emisiones correspondientes.

### 7.1. IMPULSIONES EN EL SISTEMA SUPERFICIAL

Como ya se ha mencionado precedentemente, la Demarcación Hidrográfica del Segura utiliza recursos provenientes de otras demarcaciones para satisfacer sus demandas, siendo el sistema del ATS el de mayor importancia.

El ATS, cuenta con impulsiones en el sistema superficial que cumplen con la función de elevar el recurso hídrico hasta las tomas de demandas correspondientes, en su mayoría Unidades de Demanda Agrarias.

La infraestructura hidráulica del sistema Tajo-Segura, como se presenta en la *Ilustración 7*, está compuesta por:

- Acueducto Tajo-Segura (ATS): conexión desde el embalse de Bolarque (Río Tajo) a Embalse del Talave.
- Postravase: conecta el Embalse de Talave con el Azud de Ojós.
- Canal Principal Margen Derecha (CPMD) y Canal Principal Margen Izquierda (CPMI): ambos comienzan en el Azud de Ojós.

Se han caracterizado cada una de las principales impulsiones con el objetivo de estimar costes y emisiones de CO<sub>2</sub> en función de la energía consumida para elevar un caudal determinado. En la

Gráfico 1 Ilustración 7 se han representado con círculos cuyo tamaño es proporcional al consumo energético de la impulsión.

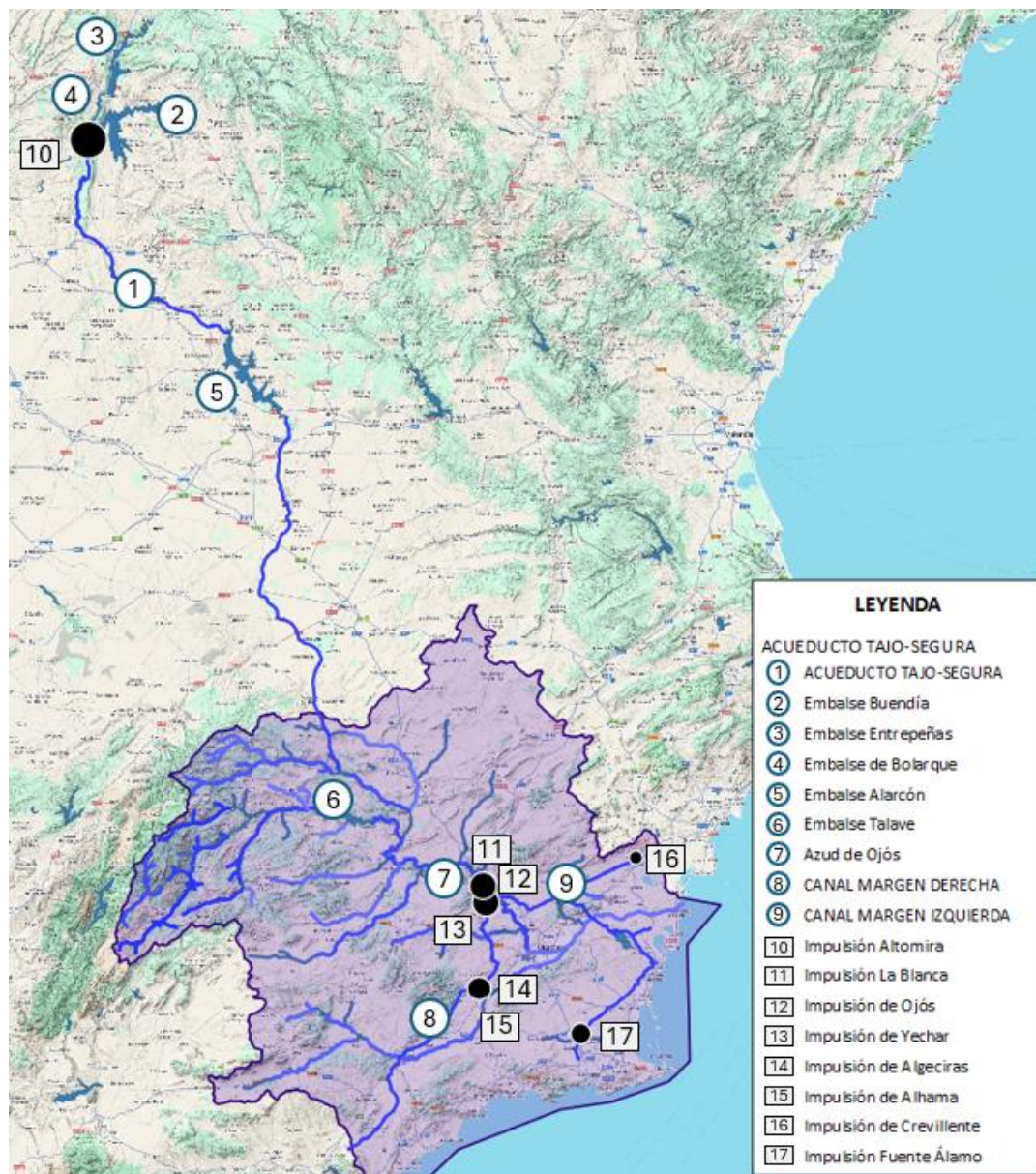


Ilustración 7. Infraestructura hidráulica de trasvase Tajo-Segura.  
Elaborada partir de información CHS y cartografía base QGIS.

En la Tabla 4, se exponen los valores que caracterizan a cada una de las impulsiones y que han sido adoptados en los ficheros internos de los evaluadores descritos en los apartados precedentes.

La información ha sido obtenida de diversas fuentes bibliográficas, entre las que se destaca “*La eficiencia energética del trasvase Tajo-Segura*” (Melgarejo et al., 2009), de donde se pudo extraer la altura de elevación y el consumo energético característico de cada una de las impulsiones.

En cuanto al coste de la energía se ha adoptado la tarifa promedio correspondiente al año 2023 para categoría 6.1TD (Grandes usuarios) publicado en la página web de OMIE (Operador de Mercado Ibérico de Energía).

Se tomado como referencia para el factor de emisión de CO<sub>2</sub> asociado al consumo energético, el correspondiente al valor medio de los datos publicados por la red eléctrica española de la Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia para el año 2022.

Tabla 4. Caracterización de costes y emisiones de impulsiones en el sistema Tajo-Segura

Nombre de Impulsión	Ubicación	Altura elevación	Consumo energético	Coste de energía	Factor de emisión
		[m]	[kWh/m <sup>3</sup> ]	[€/kWh]	[kgCO <sub>2</sub> /kWh]
Altomira	ATS	245-270	0,870	0,177	0,273
Blanca	Postrasvase	171	0,549	0,177	0,273
Ojós	CPMD	150	0,515	0,177	0,273
Yechar	CPMD	124	0,556	0,177	0,273
Algeciras	CPMD	45	0,102	0,177	0,273
Alhama	CPMD	115	0,413	0,177	0,273
Crevillente	CPMI	25,5	0,094	0,177	0,273
Fuente Álamo	CPMI	93	0,347	0,177	0,273

## 7.2. INSTALACIONES DESALADORAS DE AGUA DE MAR

Las instalaciones desaladoras, ya sean de aguas salobres de pozo, de mar o aguas residuales, han adquirido un rol importante en los últimos años para satisfacer necesidades de suministro de demandas, principalmente urbanas, en regiones áridas. Según expresan Melgarejo Moreno et al. (2020) *“España es la principal productora de agua desalada en Europa, ocupando el cuarto lugar respecto a capacidad instalada en el mundo, por detrás de Arabia Saudita, Emiratos Árabes Unidos y Estados Unidos”*.

En el Apartado 6 *“CASO DE ESTUDIO: DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL SEGURA”*, se ha destacado la importancia de la desalinización y lo costoso que es llegar a aprovechar la capacidad de producción instada en la demarcación.

En los evaluadores desarrollados, se han incorporado las instalaciones desaladoras de agua de mar de mayor producción cuyo costo de explotación es relevante para la gestión del recurso. Su ubicación dentro del sistema se expone en la *Ilustración 8*, en donde el tamaño del círculo con que se representa a cada una de ellas es proporcional a la capacidad de producción que cuenta la IDAM.

Al momento de incorporar las desaladoras en los evaluadores hidroeconómicos y ambientales, se ha caracterizado a cada una por su **consumo energético** asociado a costes de operación y mantenimiento por metro cúbico de agua tratada. Esta información se publica anualmente por parte de los organismos gestores, entre los que se destacan Mancomunidad de Canales de Taibilla y ACUAMED (ver *Tabla 5*). Es necesario mencionar, que se están implementando mejoras en las

instalaciones con el fin de disminuir tanto el consumo energético, como las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, cambiando la forma de alimentación a energías limpias y renovables.

La capacidad de producción de cada una de las instalaciones desaladoras se ha obtenido del Anejo 03 del Proyecto de Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura 2022/27. En la tabla se diferencia la capacidad de producción que es destinada a regadíos y a abastecimiento urbano, industrial no conectado y campos de golf.

A igual que en las impulsiones, se tomado como referencia para el factor de emisión de CO<sub>2</sub> asociado al consumo energético, el correspondiente al valor medio de los datos publicados por la red eléctrica española de la CNMC para el año 2022.

El costo de la energía se ha calculado utilizando un valor basado en la factura energética y la producción de las desaladoras de agua de mar administradas por la MCT durante el año 2021, publicado en el anuario del organismo gestor.

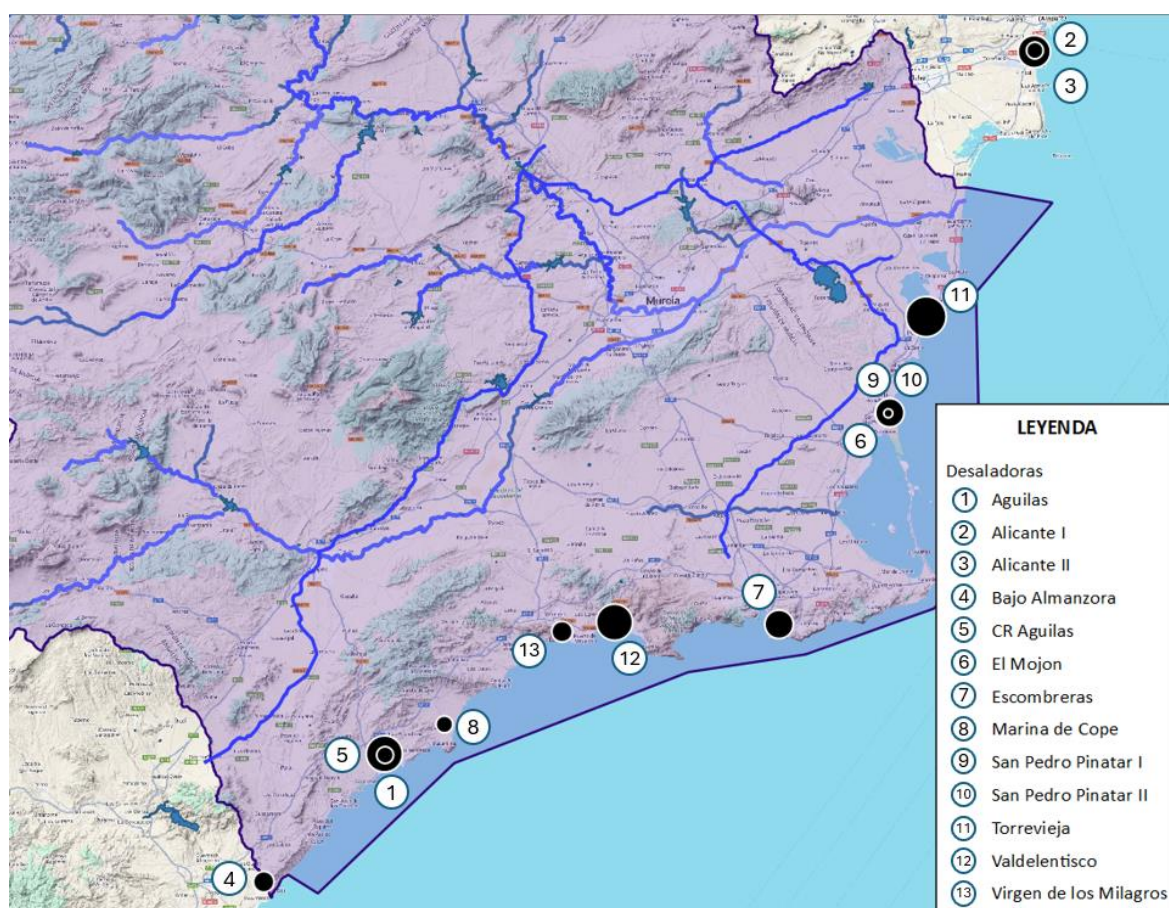


Ilustración 8. Ubicación de Instalaciones desaladoras de agua de Mar.  
Elaborada partir de información CHS y cartografía base QGIS.

Según la publicación de Melgarejo Moreno y Fernández Mejuto (2020), los costes variables de las desaladoras se desglosan de la siguiente manera:

- 59% consumo energético
- 13% costes de operación y mantenimiento
- 28% costos fijos.

De manera simplificada, se ha estimado que los costes variables de cada desaladora son proporcionales a su consumo energético, los costes obtenidos se presentan en la *Tabla 5*.

Tabla 5. Caracterización de costes y emisiones de instalaciones desaladoras de agua de mar

Desaladora	Organismo Gestor	Capacidad [hm <sup>3</sup> /año]		Consumo energético	Coste de energía	Costes variables	Factor de emisión
		Regadío	Urbano y otros	[kWh/m <sup>3</sup> ]	[€/kWh]	[€/m <sup>3</sup> ]	[kgCO <sub>2</sub> /kWh]
Alicante I	Mancomunidad de Canales del Taibilla (MCT)		45	5,06	0,069	0,211	0,273
Alicante II				2,51	0,069	0,105	0,273
San Pedro del Pinatar I			48	4,22	0,069	0,176	0,273
San Pedro del Pinatar II				3,75	0,069	0,156	0,273
Valdelentisco	ACUAMED	37	13	4,52	0,069	0,188	0,273
Águilas		48	12	4,29	0,069	0,178	0,273
Torrevieja		40	40	4,75	0,069	0,198	0,273
Bajo Almanzora		7		4,32	0,069	0,180	0,273
C.R. Campo Cartagena	Privadas	2		4,32	0,069	0,180	0,273
C.R. Virgen de Los Milagros		10		4,36	0,069	0,182	0,273
C.R. Marina de Cope		5		4,10	0,069	0,171	0,273
C.R. Águilas		4		4,36	0,069	0,182	0,273
Escombreras	CARM	7	14	3,75	0,069	0,156	0,273

\* En "urbano y otros" se contemplan abastecimientos urbanos, industrias no conectadas y regadíos de campos de golf.

### 7.3. ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES

Las estaciones depuradoras de aguas residuales son las encargadas de posibilitar la reutilización del recurso para cubrir necesidades de demandas agrarias, luego de pasar por tratamientos avanzados.

No todas las estaciones depuradoras brindan la posibilidad de reutilización, es por eso que en el evaluador solo se han incorporado costes y emisiones de aquellas que sí lo permiten, ya que intervienen en el balance económico al momento de estimar los beneficios ocasionados por las unidades de demanda agrarias.

En la *Ilustración 9* se presentan las estaciones depuradoras que se han incluido en los evaluadores desarrollados, en donde el tamaño del círculo representado es proporcional al tamaño de la EDAR.

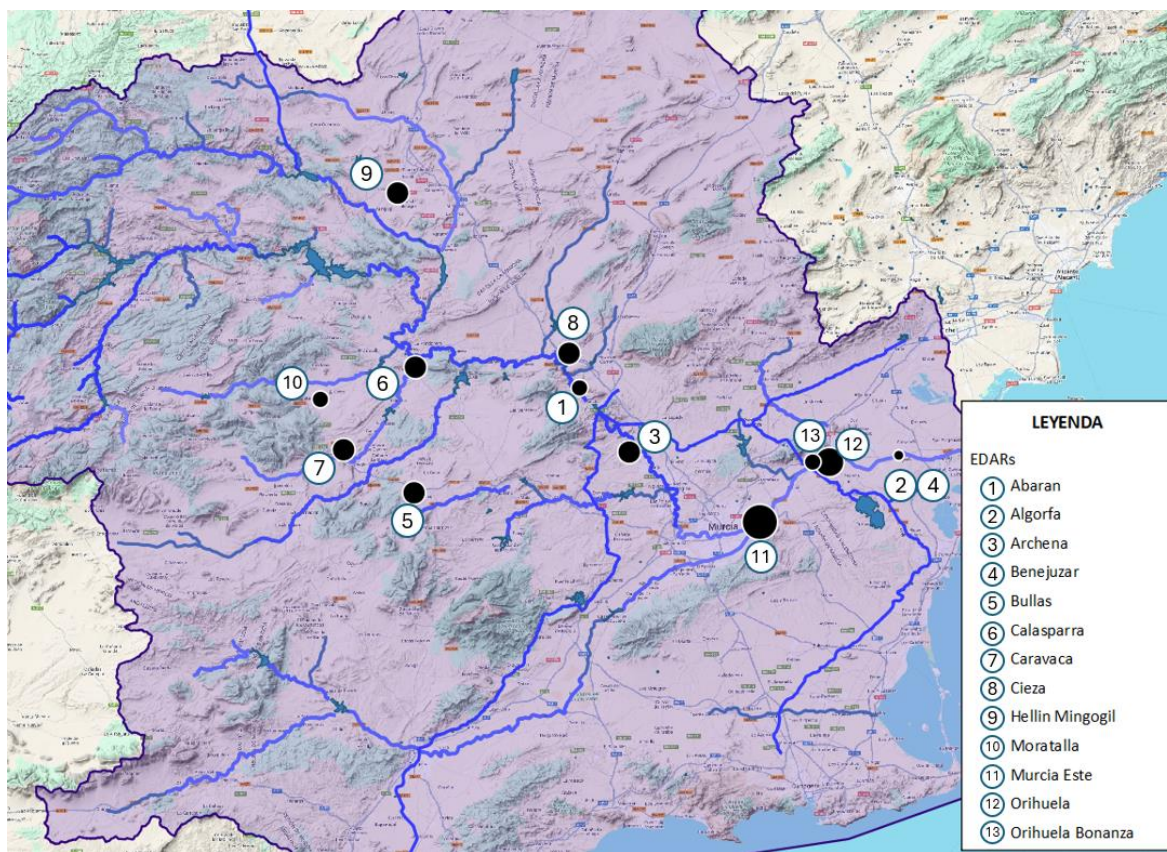


Ilustración 9. Ubicación de Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales.  
Elaborada partir de información CHS y cartografía base QGIS.

Las estaciones depuradoras han sido caracterizadas por su consumo energético promedio estimado por medio de la *Ecuación 17*, propuesta por Martínez Cebrián (2019).

$$y = 0,2223 \cdot x^{-1,669} \quad \text{Ecuación 17}$$

En donde:

- $y$ : consumo energético en kWh/m<sup>3</sup>,
- $x = \log(\log(h - e))$
- $(h - e)$ : es el tamaño de la planta en habitantes equivalentes, variable que mide la carga total contaminante.

El dato del tamaño en habitantes equivalentes ( $h - e$ ) de las EDARs se ha obtenido en los portales web de los organismos gestores que operan las estaciones depuradoras: ESAMUR y EPSAR según corresponda.

En cuanto al coste de la energía se ha adoptado la tarifa promedio correspondiente al año 2023 para categoría 6.1TD (Grandes usuarios) publicado en la página web de OMIE.

Se tomado como referencia para el factor de emisión de CO<sub>2</sub> asociado al consumo energético, el correspondiente al valor medio de los datos publicado por la red eléctrica española de la CNMC para el año 2022.

Tabla 6. Caracterización de costes y emisiones de estaciones depuradoras de agua residual

EDAR	ORGANISMO GESTOR	Tamaño EDAR	Consumo energético	Coste de energía	Costes variables	Factor de emisión
		(h-e)	[kWh/m <sup>3</sup> ]	[€/kWh]	[€/m <sup>3</sup> ]	[kgCO <sub>2</sub> /kWh]
Abarán	ESAMUR	13180	0,501	0,177	0,158	0,273
Algorfa	EPSAR	8896	0,527	0,177	0,166	0,273
Archena	ESAMUR	33127	0,450	0,177	0,142	0,273
Benejúzar	EPSAR	8896	0,527	0,177	0,166	0,273
Bullas	ESAMUR	35252	0,447	0,177	0,141	0,273
Calasparra	ESAMUR	27627	0,459	0,177	0,144	0,273
Caravaca de la Cruz	ESAMUR	24866	0,465	0,177	0,146	0,273
Cieza	ESAMUR	68564	0,419	0,177	0,132	0,273
Hellín	PESA	51655	0,430	0,177	0,135	0,273
Moratalla	ESAMUR	11383	0,510	0,177	0,160	0,273
Murcia Este	ESAMUR	581368	0,351	0,177	0,110	0,273
Orihuela	EPSAR	37117	0,445	0,177	0,140	0,273
Orihuela Bonanza	EPSAR	8867	0,527	0,177	0,166	0,273

#### 7.4. BOMBEO PARA SUMINISTRO DE DEMANDAS AGRARIAS

En la Demarcación Hidrográfica del Segura, existe una fuerte explotación de aguas subterráneas destinadas al riego en las Unidades de Demanda Agrarias (UDA), es por ello por lo que se han estudiado 109 bombeos representativos (*Ilustración 10*) agrupados por masas de agua subterráneas ya citadas en el *Apartado 6 “CASO DE ESTUDIO: DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL SEGURA”*.

Cada uno de los bombeos se caracteriza según la energía requerida para elevar el volumen de agua desde el pozo de captación hasta el sitio en donde se aplicará el riego. En consecuencia, la energía requerida variará según la altura, potencia y rendimiento del esquema de bombeo en cada una de las extracciones.

La **altura de bombeo** es función de la cota del terreno natural en el punto de aplicación en alta y de la elevación del nivel freático de la masa de agua subterránea de la cual se realiza la extracción. En el marco del proyecto de SIAGES, se ha trabajado de manera conjunta con especialistas en materia de hidrología subterránea que desarrollaron un modelo de la cuenca del Segura con la capacidad de brindar información de nivel piezométrico variable para cada punto de observación solicitado. Tales puntos se definieron en correspondencia con los 109 bombeos antes mencionados y expuestos en la *Ilustración 10*.

En el **Apéndice 1**, se expone la caracterización de bombeos incluidos en los evaluadores. Para algunos de los parámetros se han adoptado valores aproximados recomendados en la literatura debido a la falta de información disponible. Tal es el caso del rendimiento del conjunto bomba-motor

que se ha asumido del 65%, y del radio de pozo de bombeo fijado en 1,00m para todas las instalaciones.

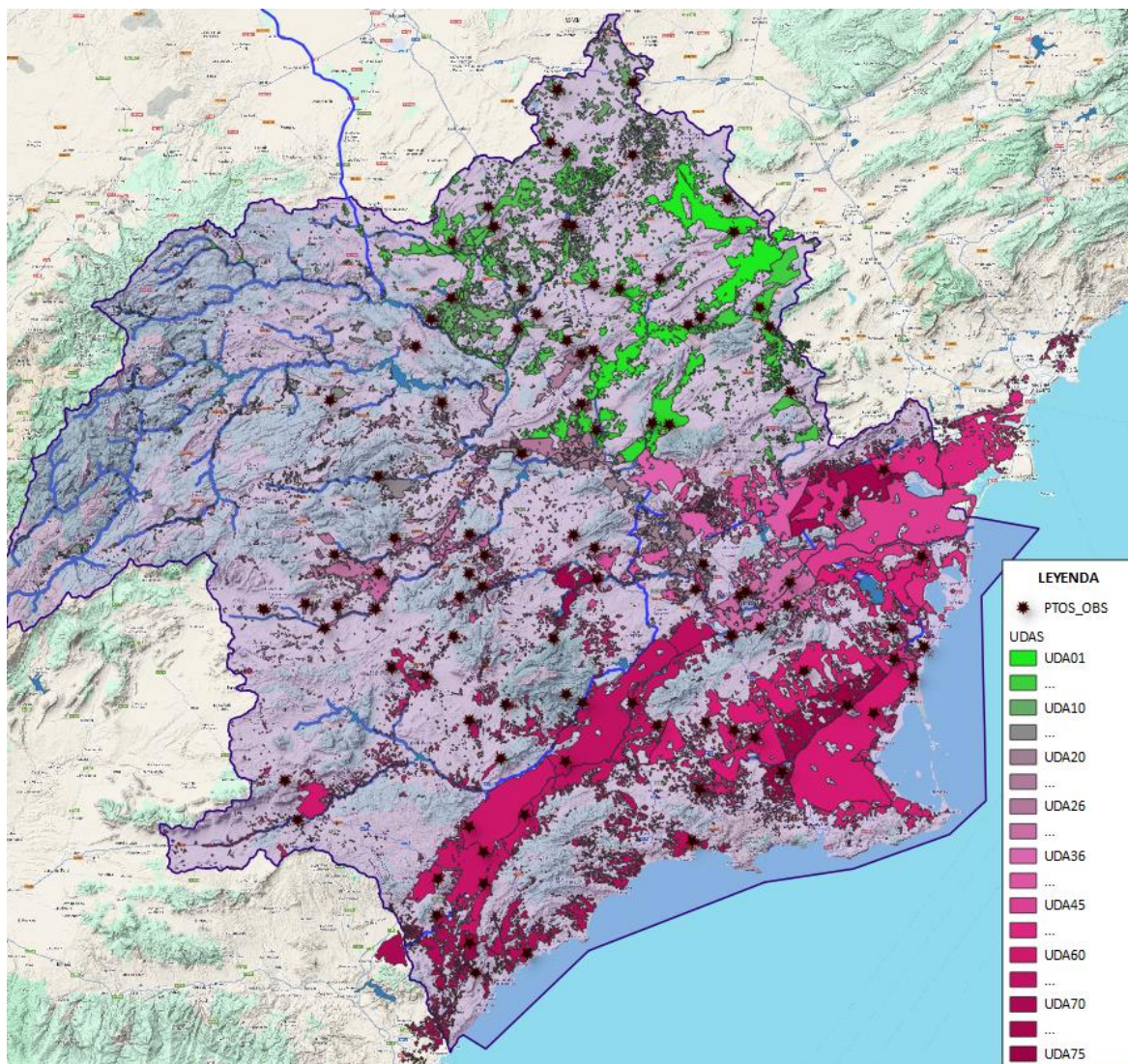


Ilustración 10. Distribución de Unidades de Demanda Agrarias y pozos de bombeos.  
Elaborada partir de información CHS y cartografía base QGIS.

Adicionalmente, para los casos en que no se cuente con series de alturas dinámicas de bombeo que puedan alimentar a los evaluadores, se ha analizado la forma en que se relacionan el volumen de cada uno de los acuíferos de la cuenca del Segura con las mediciones históricas de piezómetros dispuestos en la región. Estas relaciones permiten estimar el volumen inicial del acuífero a partir de un nivel piezométrico conocido y también la altura dinámica de bombeo (sin corrección) para una determinada serie de volúmenes en el acuífero. Esto es especialmente útil cuando los evaluadores sean utilizados en conjunto con modelos de gestión como Aquatool+, en donde la simulación de los acuíferos sólo admite una estimación de un volumen de acuífero, pero no la modelación de alturas de bombeo.



A partir del modelo de gestión asociado al Plan Hidrológico de la Cuenca del Segura, realizado por la Confederación con la herramienta Simges de Aquatool+, se extrajo información de los volúmenes de acuíferos para el período octubre 1980 – septiembre 2012.

Además, se cuenta con información del registro de medidas históricas de los piezómetros existentes en la región. Debido a la gran cantidad de datos disponibles, se ha realizado un primer filtro de mediciones por fechas considerando solo aquellas que pertenecen al período de tiempo en el que se tienen datos de volúmenes. Cada uno de los piezómetros tiene un estado que lo caracteriza, y con base en el criterio de experto fueron considerados todos aquellos elementos cuyo estado en el registro fuera de tipo: “estático”, “desconocido”, “la mayor parte estático” y “surgente”.

A la hora de realizar las regresiones, se tomaron como representativos a aquellos piezómetros que contaran con más de 30 mediciones, descartando los que registran menos datos. A excepción de los casos en que existe un único piezómetro en la masa de agua subterránea en análisis, que se ha considerado a pesar de tener menos de 20 mediciones.

Las dos relaciones mencionadas se han estudiado por separado. Por un lado, se cuentan con 109 bombeos asociados a distintas unidades de demanda agrarias, que bombean de distintas masas de agua subterráneas y se desea conocer la **relación Volumen-Altura bombeo** (Ver Gráfico 2). Por otro lado, existen 26 acuíferos en la región de estudio, cada uno con diferentes características, de los cuales se quiere conocer la **relación Nivel piezométrico-Volumen inicial** (Ver Gráfico 3).

A modo de ejemplo, se expone a continuación, un gráfico representativo de cada una de las relaciones estudiadas.

En la gráfica precedente se ha representado la relación entre la altura de bombeo y el volumen de acuífero para los 7 pozos de bombeos que se encuentran en el acuífero Sinclinal de la Higuera. La gráfica demuestra la tendencia a una relación lineal entre ambas variables, destacando el pozo denominado “b10”, en donde el coeficiente de correlación para esta serie de datos resulta muy próximo a 1, que representa la correlación perfecta.

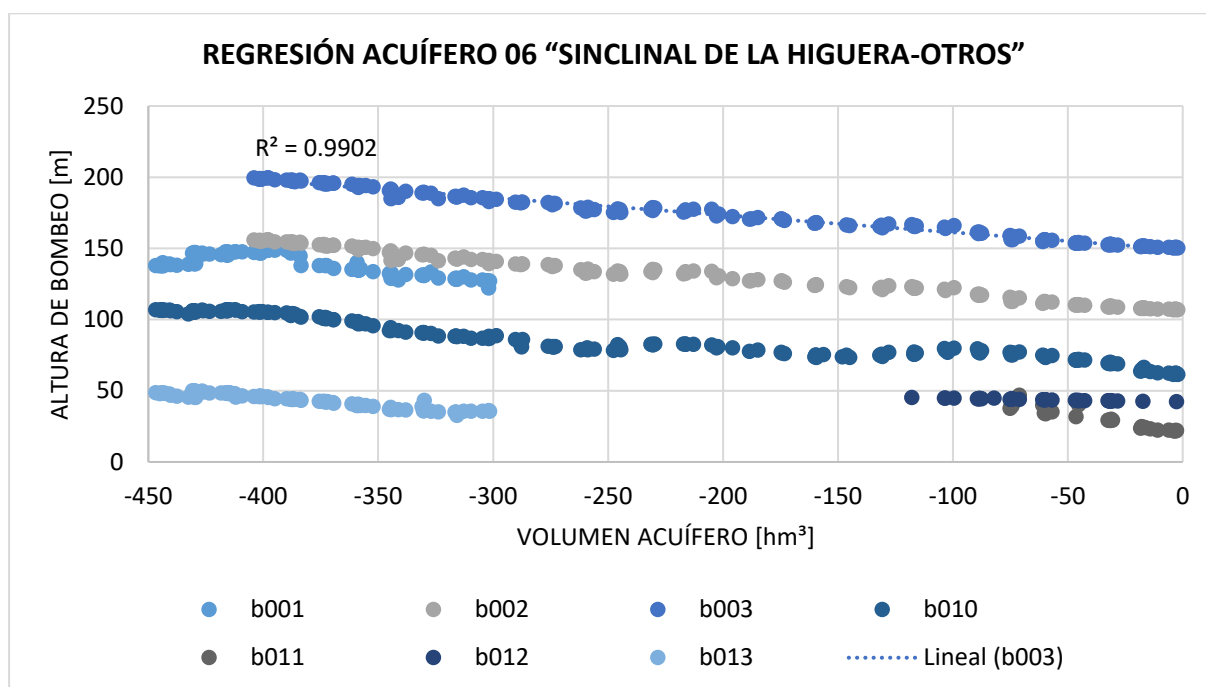


Gráfico 2. Regresión Altura de bombeo–Volumen acuífero “Sinclinal de la Higuera, otros”

Estas relaciones han sido empleadas para las simulaciones con datos históricos, ya que las series de datos disponibles corresponden a volúmenes en acuíferos y es necesaria conocer la altura bombeo para estimar la energía requerida. En el **Apéndice 2**, se presentan los resultados de las regresiones para el período octubre 1980–septiembre 2012 de todos los pozos de bombeo y acuíferos analizados de la DHS.

Por su parte, la relación entre el volumen inicial acuífero y la altura de bombeo que se presenta en el *Gráfico 3*, se emplea en el modelo de optimización de gestión de recursos para imponer las condiciones iniciales de funcionamiento del evaluador.

En el caso del acuífero Ascoy Sopalmo, que se representa en el gráfico a continuación, se aprecia a una tendencia lineal en la relación entre ambas variables que indican que, a mayor volumen de agua almacenada en el acuífero, menor será la altura de bombeo. El coeficiente de correlación mayor a 0,98 expresa esta fuerte dependencia.

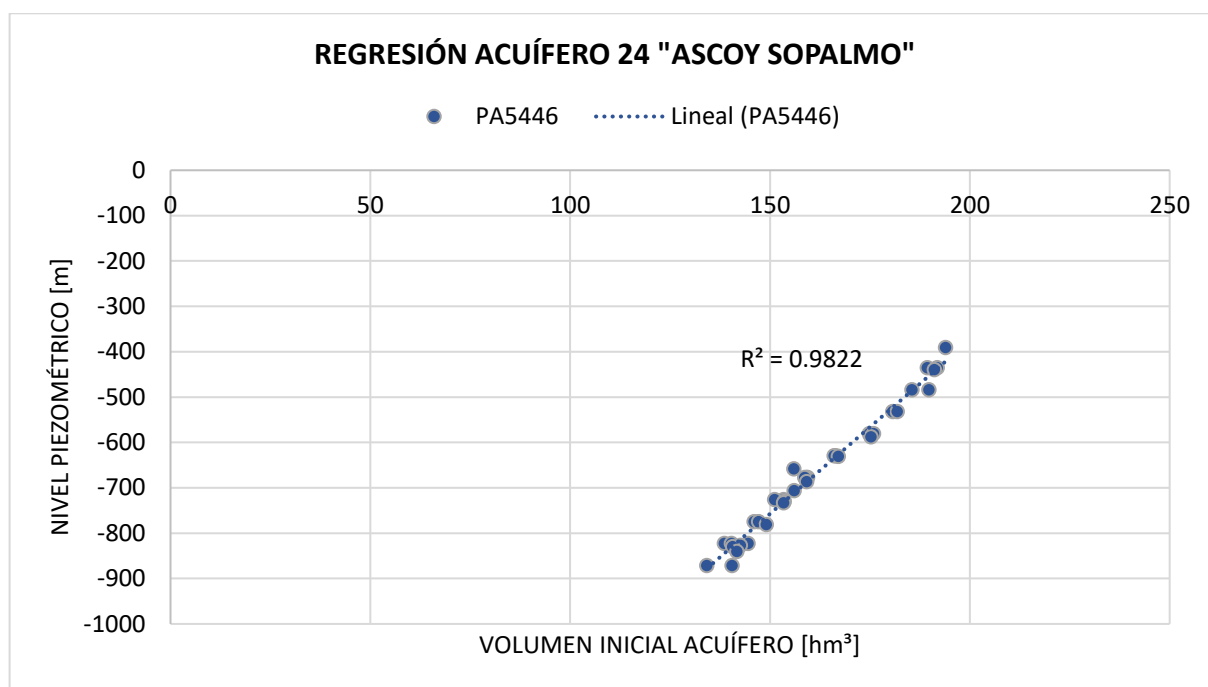


Gráfico 3. Regresión Volumen inicial acuífero–Nivel piezométrico “Ascoy Sopalmo”

## 7.5. CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

La topografía montañosa en la cabecera de la Demarcación Hidrográfica del Segura ha favorecido la instalación de numerosas centrales hidroeléctricas que emplean los recursos superficiales de la demarcación para la producción eléctrica. Su capacidad de generación relativamente baja en comparación con otros sistemas.

Las principales características de las centrales hidroeléctricas existentes en la DHS, están disponibles en el Anexo II del Anejo 03: “Parque Hidroeléctrico de la Propuesta de Proyecto de Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura”. Particularmente, se detalla el caudal máximo turbinado, la potencia instalada y el salto turbinado de cada una de las 37 centrales hidroeléctricas existentes.

En el evaluador hidroeconómico, se ha decidido incluir únicamente las 8 principales centrales hidroeléctricas, las cuales cuentan con una potencia instalada mayor a 5MW. Entre estas 8 centrales se concentra cerca del 65% de la potencia instalada total en el sistema, tal y como se expone en la *Tabla 7* y en la *Ilustración 11*. En el esquema, las centrales hidroeléctricas se representan con círculos con tamaño proporcional a su potencia instalada.

Tabla 7. Caracterización de parque hidroeléctrico de la DHS.  
Elaborada a partir de información de PHDS (2022/27)

Central	Cauce	Caudal máximo [m <sup>3</sup> /s]	Salto bruto [m]	Tipo
Fontanar I	ATS	25,00	29,15	Fluyente
Fontanar II	ATS	25,00	46,92	Fluyente
Fontanar III	ATS	25,00	65,36	Fluyente
Almadenes	Río Segura	25,00	48,00	Fluyente
Miller Segura	Río Segura	10,00	189,61	Fluyente
Miller Zumeta	Río Zumeta	5,45	190,60	Fluyente
Talave	Río Mundo	14,00	45,00	Pie de presa
Fuensanta	Río Segura	14,00	70,92	Pie de presa

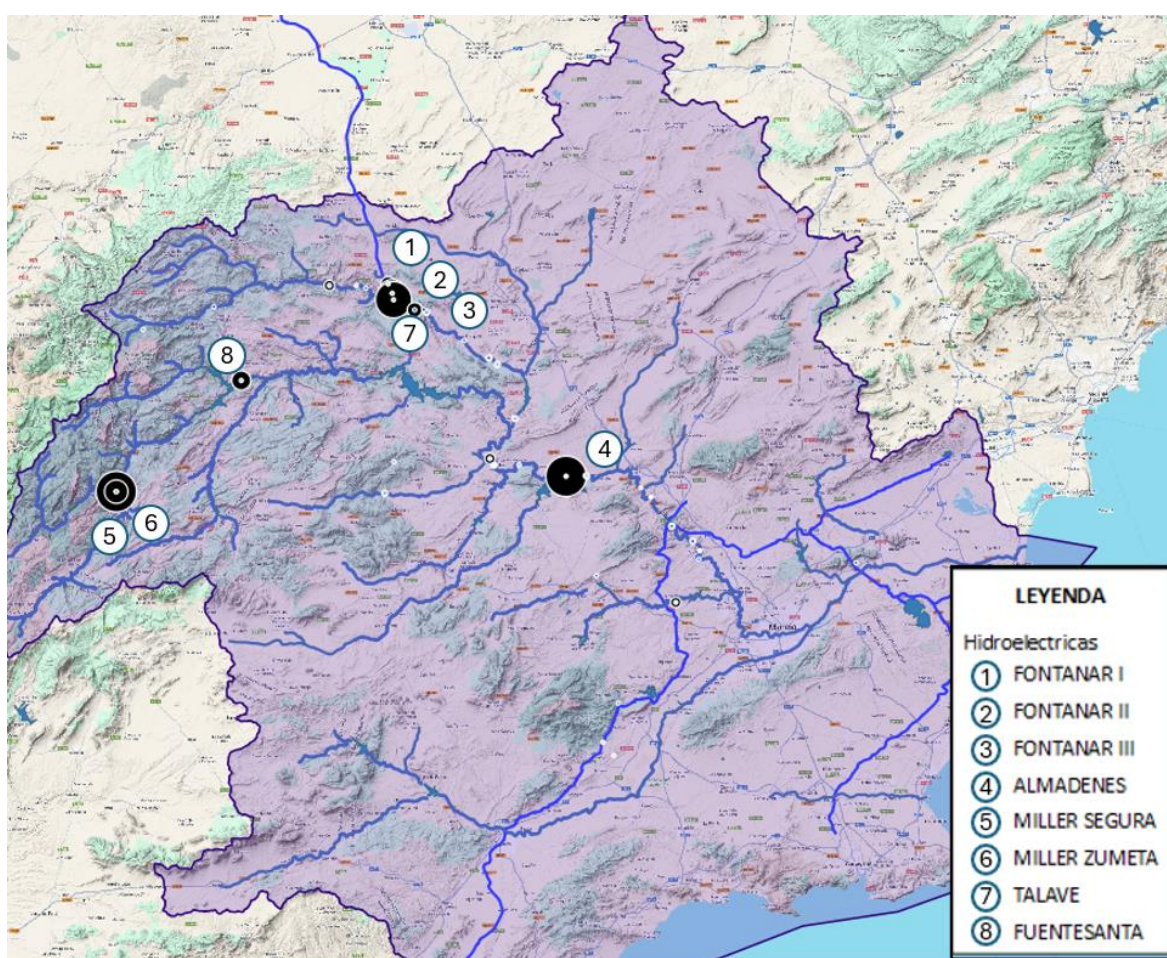


Ilustración 11. Identificación de centrales hidroeléctricas en Cuenca del Segura.  
Elaborada a partir de información CHS y cartografía base QGIS.

Conociendo que la **potencia instalada** es la potencia máxima que es capaz de producir la central en forma continua turbinando el caudal máximo, se ha estimado la eficiencia de cada una de las centrales.

Tabla 8. Estimación eficiencia centrales hidroeléctricas en CHS

Central	Caudal máximo [m <sup>3</sup> /s]	Salto bruto [m]	Potencia total instalada [MW]	Factor de Eficiencia $\epsilon$
Fontanar I	25,00	29,15	6350	0,888
Fontanar II	25,00	46,92	10300	0,895
Fontanar III	25,00	65,36	14398	0,898
Almadenes	25,00	48,00	15633	1,328
Miller Segura	10,00	189,61	17074	0,918
Miller Zumeta	5,45	190,60	8684	0,852
Talave	14,00	45,00	5530	0,895
Fuensanta	14,00	70,92	7600	0,780

Los evaluadores desarrollados tienen la capacidad para incluir centrales de tipo **fluyente** donde el salto de turbinado puede considerarse aproximadamente estático, y **centrales a pie de presa** donde la variación del salto depende directamente del volumen almacenado en el embalse asociado a la central.

Para el caso de estudio en particular y las centrales tipo fluyente, se asumió un valor estático característico de la central e igual al salto bruto. En comparación, para aquellas centrales a pie de presa, se obtuvieron las curvas cota-volumen características del embalse asociado a partir del modelo de gestión realizado por la CHS.

A continuación, se presentan las curvas cota-volumen de los embalses Talave y Fuensanta que se han incluido en el evaluador hidroeconómico. Las curvas del *Gráfico 4* permiten estimar el nivel de agua en el embalse que permitirá calcular el salto turbinado. En las mismas gráficas, se han incluido las ecuaciones de la relación cota-volumen con un alto coeficiente de correlación, en ambos casos 0,999.

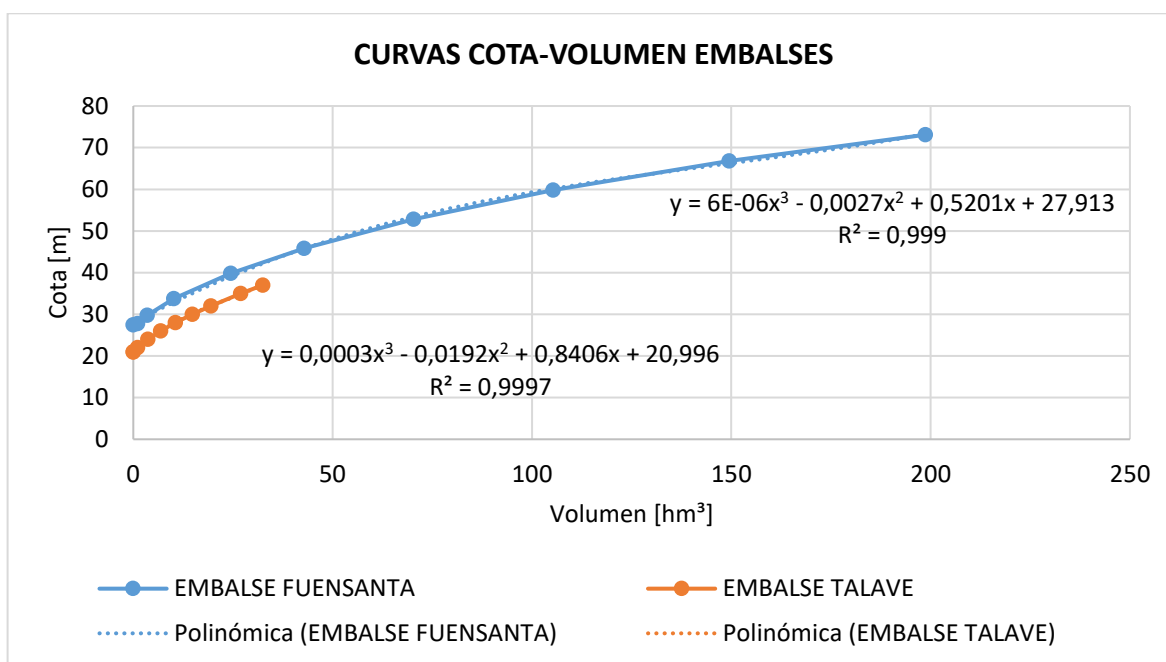


Gráfico 4. Curva Cota-Volumen embalse  
Información extraída de Modelo Aquatool-SIMGES, PHDS 2015/21

## 7.6. UNIDADES DE DEMANDA AGRARIA

Por último, el evaluador hidroeconómico es capaz de estimar el beneficio neto de las Unidades de Demanda Agraria expuestas en la *Ilustración 10. Distribución de Unidades de Demanda Agrarias y pozos de bombeos*.

Este apartado, toma especial importancia al considerar que la agricultura es una actividad importante en la economía española, principalmente en la Demarcación Hidrográfica del Segura, ya que en las provincias de Alicante, Almería y Murcia realizan el 71% de las exportaciones nacionales de hortalizas y el 25% de frutas.

El Anexo V del Anejo III del Proyecto de Plan Hidrológico de la Demarcación del Segura "*Fichas de caracterización de las Unidades de Demanda Agraria*", dispone de información detallada de superficie, principales cultivos y rendimientos de cada UDA que dan origen a curvas de demanda características. En el *Gráfico 5*, a modo de ejemplo, se expone la curva de demanda bruta de la UDA 60 "*Regadíos aguas arriba de Puentes*" extraída del PH del Segura.

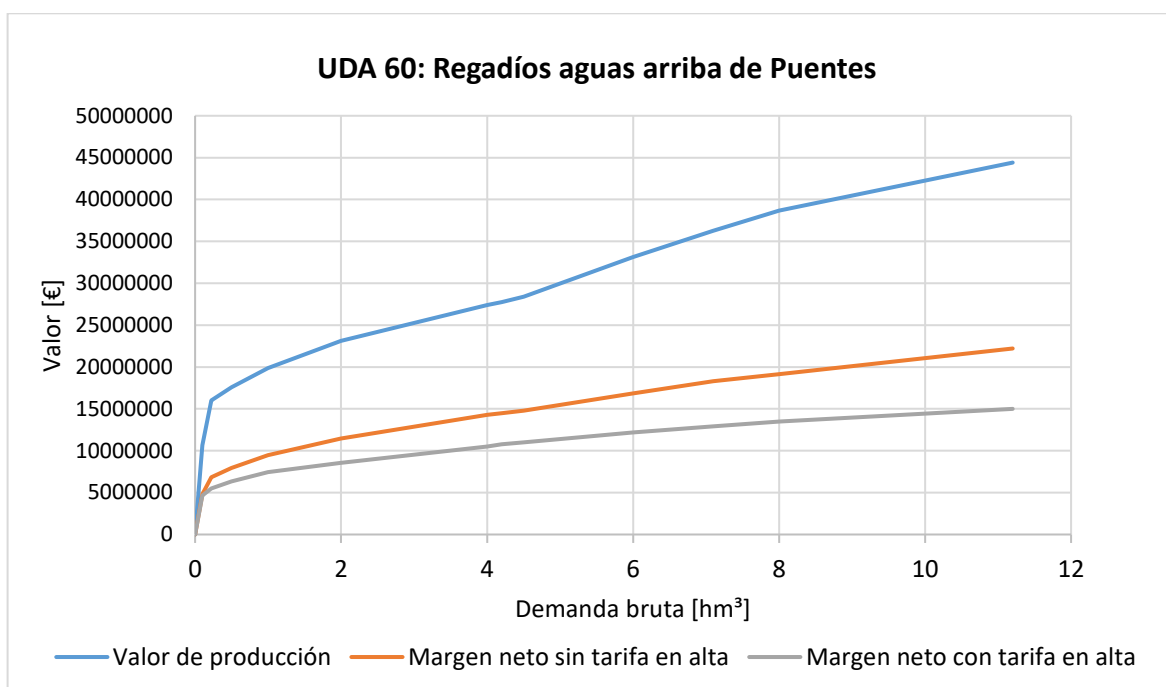


Gráfico 5. Curva de Demanda Bruta “UDA 60–Regadíos aguas arriba de Puentes”

Fuente: Anexo V del Anejo III del Proyecto de Plan Hidrológico de la Demarcación del Segura (2022/27)

A modo simplificado para el desarrollo del evaluador, se ha adoptado el valor de Margen Neto de producción en alta para cada una de las Unidades de Demanda, que permitirá estimar el beneficio Neto, valor también publicado en el Plan Hidrográfico de la cuenca en estudio. En Apéndice 3, se incluye la tabla con los valores contemplados.

## 7.7. CAUDALES ECOLÓGICOS EN MASAS DE AGUA SUPERFICIALES

En la publicación “*Revisión del Plan Especial de Sequía*” (DHS, 2018), se establecen los caudales ecológicos mínimos en normalidad y en sequías prolongadas para cada una de las 77 masas de aguas superficiales que componen la demarcación (Ver “*Ilustración 5. Identificación de masas de aguas superficiales Cuenca del Segura*”).

En el desarrollo de la herramienta se ha considerado el criterio propuesto por la Demarcación Hidrográfica del Segura, en donde se establece que si el IES Global es menor a 0,3 toda la cuenca se encuentra en “**sequía prolongada**” y corresponden caudales ecológicos en **estado de escasez**. De lo contrario, se evaluará el IES correspondiente a cada masa de agua mensualmente y así considerar cuál es el valor del caudal ecológico de cada período.

En el evaluador se ha caracterizado cada una de las masas, identificando la zona a la que pertenece y los valores de caudales mínimos para cada estado posible, incluyéndolos en un fichero de detalles interno a la herramienta.

Tabla 9. Caudales ecológicos mínimos en masas de agua superficiales  
Fuente: Anexo I – Revisión del Plan Especial de Sequía DHS (2018)

Masa	Zona	Estado	Caudal ecológico [hm <sup>3</sup> /mes]											
			Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
ES0701010109	1	Escasez	2,01	2,01	2,01	2,18	2,18	2,18	2,20	2,20	2,20	1,68	1,68	1,68
ES0701010110	1	Escasez	2,49	2,49	2,49	2,62	2,62	2,62	2,16	2,16	2,16	1,35	1,35	1,35
ES0701010111	1	Escasez	2,32	2,32	2,32	2,77	2,77	2,77	2,31	2,31	2,31	1,43	1,43	1,43
ES0701010113	1	Escasez	1,36	1,36	1,36	1,47	1,47	1,47	1,37	1,37	1,37	1,14	1,14	1,14
...														
ES0701012002	4	Normal	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05
ES0701012701	4	Normal	0,08	0,08	0,08	0,10	0,10	0,10	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07
ES0701012901	4	Normal	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
ES0701012902	4	Normal	0,13	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,11	0,11	0,11	0,09	0,09	0,09

Se presenta solo una parte de la tabla debido a su extensa longitud, en el *Apéndice 4* se adjunta la tabla completa con todos los valores adoptados.



## 8. RESUMEN ESCENARIOS SIMULADOS

---

Se han realizado varias simulaciones con el fin de probar la bondad del evaluador y analizar los resultados bajo tres escenarios, esto con el objetivo de exponer una posible metodología de análisis que actúe de soporte a la Gestión del Recurso Hídrico.

En primer lugar, se analizarán resultados de simulaciones con **series históricas** derivadas del modelo de Aquatool+-SIMGES realizado por la Confederación Hidrográfica del Segura para la serie corta (1980-2011) del periodo Planificación 2015-2021 el cual fue el estudio tomado como base para el desarrollo del proyecto SIAGES del que se desprenden estos resultados.

En la serie de datos disponible, se cuenta con información a escala semanal, pero se han acumulado a valores mensuales para simplificar la ejecución de los evaluadores. Con los resultados, se analizará en qué medida influye económica y ambientalmente en el sistema una disminución de recurso disponible en la cuenca general, cuál es el elemento que más afecta en el balance económico, relaciones entre los elementos modelados, etc.

Los otros dos escenarios abordarán horizontes temporales de predicción al corto plazo. Para ello se aprovecharon los datos obtenidos dentro del **entorno de SIAGES** haciendo hincapié que son datos de **predicciones futuras**, estimadas en marzo de 2023 para el período a corto plazo y estacional, muy útiles para la toma de decisiones en tiempo real. La metodología para la estimación de predicciones se ha presentado en el Capítulo 1.2 “*CONTEXTO DEL TFM DENTRO DEL PROYECTO SIAGES*”.

Se debe recordar que SIAGES ofrece resultados para tres enfoques de gestión distintos:

- **Simulación gestión**, en donde las asignaciones de recursos vienen dadas por las reglas de gestión actuales de recursos hídricos.
- **Optimización gestión**, en donde se optimizan las asignaciones a cada una de las demandas.
- **Optimización hidroeconómica**, en donde se optimizan las asignaciones con un enfoque de eficiencia económica operacional.

El período a **corto plazo** que se ha considerado para la simulación corresponde a 15 días de duración, del 08/03/2023 a 22/03/2023. Las predicciones obtenidas por la línea METEO de SIAGES, se componen por un total de 21 trayectorias (1 determinista y 20 probabilísticas). El período **estacional** empleado para el procesamiento cuenta con 7 meses de duración, de noviembre 2022 a mayo 2023. Las predicciones correspondientes a este escenario se componen por 51 trayectorias.

En las simulaciones realizadas con información proveniente del proyecto SIAGES, se estudiará cual es el elemento de mayor peso en la estimación de costes del sistema y de qué forma se relacionan. Es importante destacar que los resultados dependerán de las condiciones iniciales en que se encontraba la cuenca al momento de realizar la predicción.

## 9. RESULTADOS DEL EVALUADOR HIDROECONÓMICO

### 9.1. RESULTADOS SIMULACIÓN SERIES HISTÓRICAS 1980-2011

A partir de la información contenida en el PHDS se realizó una evaluación del sistema con las herramientas desarrolladas para el periodo histórico 1980-2011. En los numerales siguientes se presentan y analizan los resultados obtenidos, y se abordan recomendaciones respecto a la gestión del sistema.

#### 9.1.1. IMPULSIONES EN SISTEMA SUPERFICIAL

En la siguiente tabla se presentan los caudales de las impulsiones introducidos en el evaluador para el período octubre 1980 a septiembre de 2012. Es necesario aclarar que, previamente al procesamiento de datos por parte del evaluador hidroeconómico, se decidió acumular los caudales de impulsiones a valores mensuales, para simplificar la ejecución.

Vale la pena recordar que todas las impulsiones analizadas pertenecen a la infraestructura del Acueducto Tajo Segura. Las impulsiones de Altomira y La Blanca corresponden al trasvase y el resto a infraestructuras del postravase, ya sea Canal Principal Margen Izquierda o Margen Derecha.

Tabla 10. Caudal de impulsiones en sistema superficial  
Información extraída de Modelo Aquatool-SIMGES, PHDS 2015/21

ID IMPULSIÓN	DESCRIPCIÓN	UBICACIÓN	NOMBRE TRAMO EN AQUATOOL-SIMGES	Caudal [hm <sup>3</sup> /mes]		
				Min	Max	Medio
<b>Imp 01</b>	Altomira	ATS	Acueducto Tajo-Segura 2	4,796	37,339	25,416
<b>Imp 02</b>	Ojós	CPMD	Trasvase derecha I	0,050	23,053	8,545
<b>Imp 03</b>	Yechar	CPMD	Trasvase derecha Yechar	0,020	0,890	0,360
<b>Imp 04</b>	Algeciras	CPMD	Toma Algeciras	0,000	15,000	4,286
<b>Imp 05</b>	Alhama	CPMD	Trasvase derecha III	1,397	12,519	7,088
<b>Imp 06</b>	La Blanca	Postravase	Trasvase zona II	0,170	23,170	9,212
<b>Imp 07</b>	Crevillente	CPMI	Trasvase a Crevillente	0,000	13,000	8,018
<b>Imp 08</b>	Fuente Álamo	CPMI	Impulsión de Fuente Álamo	1,250	1,250	1,250

En los *Gráfico 6 y 7* se presenta el comportamiento de los costes de operación de las impulsiones del sistema a lo largo del periodo histórico. Nótese que, al ser responsable de impulsar la totalidad de los caudales trasvasados al sistema y la mayor altura de elevación, los costes de la impulsión de **Altomira** son muy superiores a los del resto de impulsiones. Por esta razón, y para su facilidad de interpretación, sus costes se han representado respecto a un eje independiente a la derecha de la gráfica.

Las impulsiones de La Blanca y de Ojós son las que le siguen en orden de importancia. La impulsión de La Blanca pertenece a la infraestructura del trasvase y el caudal a bombear contempla lo que se derivará a toda la infraestructura del postravase. Las impulsiones restantes pertenecen al

postrasvase y, tanto los desniveles a saltar, como el caudal que bombean son menores, lo cual se asocia al menor coste de operación.

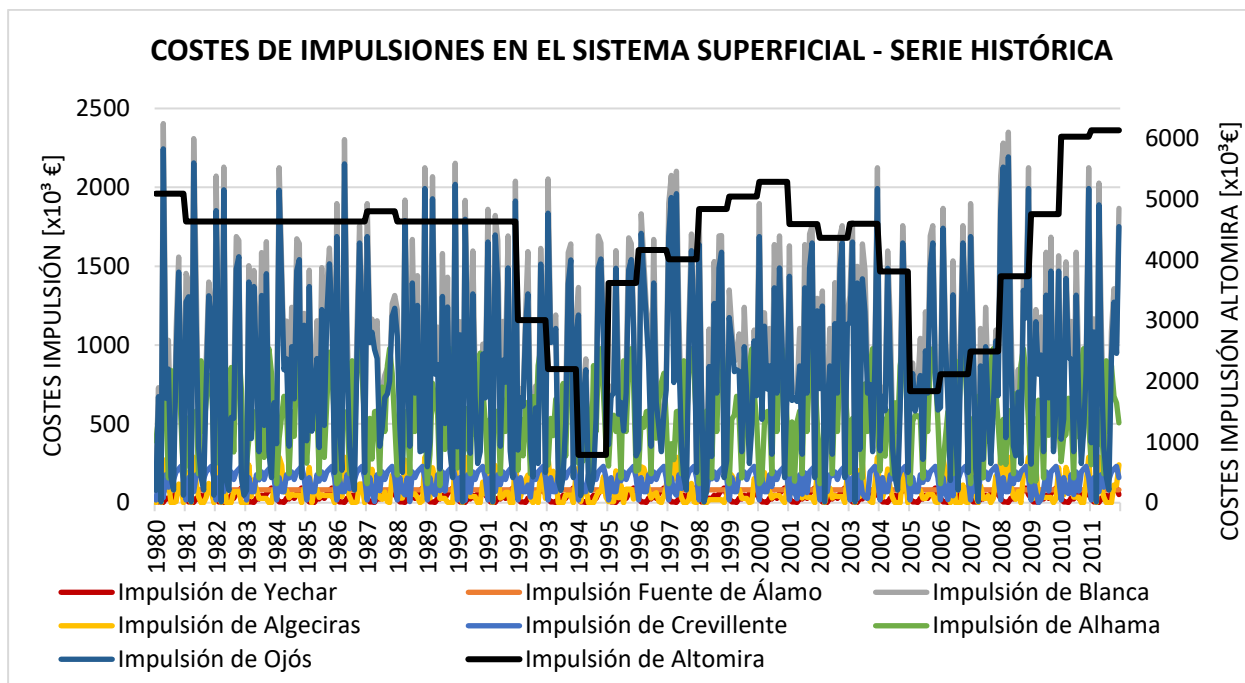


Gráfico 6. Costes mensuales de impulsiones. Serie histórica

En la gráfica se aprecia que las impulsiones de Altomira, La Blanca, Ojós y Alhama son las de mayores costes de operación en el período de tiempo analizado. Con el fin de poder apreciar los resultados con mayor claridad, en la siguiente gráfica se han acumulado los costes de cada una de las impulsiones anualmente.

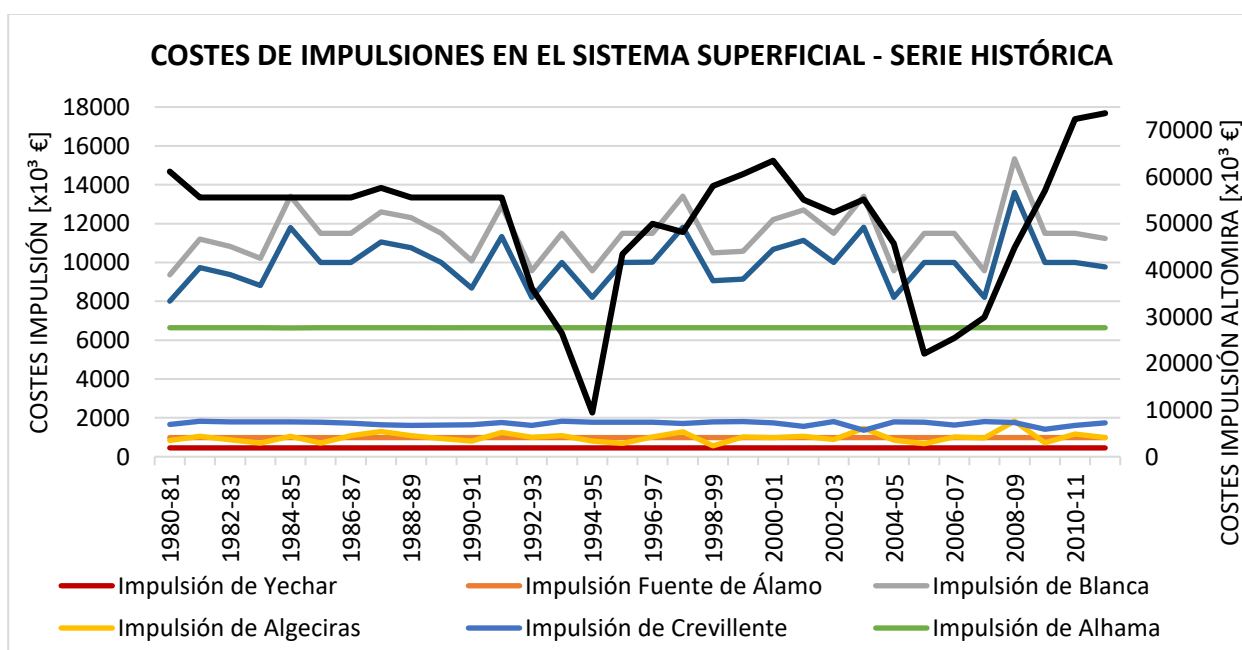


Gráfico 7. Costes acumulados anuales de impulsiones. Serie histórica

De la gráfica precedente, se desprende que la cuarta impulsión en importancia es la de Alhama, perteneciente al canal principal de margen derecha, lo cual resalta la relevancia hidroeconómica que, bajo el esquema de gestión actual, tienen los caudales que son bombeados para los regadíos abastecidos por este canal.

En el *Gráfico 7*, se aprecia con claridad el no trasvase en los años 1991-94 y 2004-05, período en el cual ocurrió una sequía histórica en la península ibérica. Se puede intuir que, en los embalses de cabecera, el volumen embalsado fue inferior al mínimo establecido para posibilitar los trasvases según lo establecido en la Ley 52/1980, citada en el Capítulo 6 “CASO DE ESTUDIO: DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL SEGURA”

Nótese que, en la gráfica de costes acumulados anuales, las impulsiones correspondientes a infraestructuras de postrasvase: Alhama, Yechar y Fuente Álamo se mantienen constantes, pero no lo son en los costes de operación mensuales, en donde si se aprecia una variabilidad (Ver *Gráfico 6*). Esto significa que anualmente la asignación total se mantiene, aunque fluctúen las asignaciones mes a mes.

En la *Tabla 11* se expone el resumen de costes mensuales de impulsiones para la serie histórica, la cual reproduce lo ya comentado en los párrafos precedentes.

Tabla 11. Resumen costes mensuales de impulsiones. Serie histórica

IMPULSIONES	COSTES [x10 <sup>3</sup> €/mes]					
	MIN	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	MAX	PROMEDIO
Impulsión de Yechar	2,10	19,44	29,95	53,33	93,52	37,83
Impulsión Fuente de Álamo	81,98	81,98	81,98	81,98	81,98	81,98
Impulsión de Blanca	0,00	0,00	51,72	120,36	184,69	69,17
Impulsión de Algeciras	0,00	18,76	46,46	121,89	289,17	82,62
Impulsión de Crevillente	0,00	71,06	159,89	195,43	230,96	142,44
Impulsión de Alhama	109,05	389,95	544,95	771,28	977,20	553,26
Impulsión de Ojós	4,87	353,11	743,20	1235,04	2243,86	831,77
Impulsión de Altomira	788,61	3792,17	4634,62	4664,88	6139,65	4179,21

De la tabla se concluye que los costes de la impulsión de Altomira resultan considerablemente mayores al resto de impulsiones, debido a ser el primer bombeo con mayor desnivel a salvar y que contempla el total del caudal trasvasado.

La distribución de costes dentro de cada impulsión es muy variable. Por un lado, se tiene la impulsión de Fuente Álamo cuya distribución es uniforme, donde todos los percentiles tienen el mismo valor. Esta impulsión pertenece al postrasvase, más precisamente al Canal Principal Margen Izquierda. Su uniformidad representa que en el último tramo de la distribución se ha podido abastecer a los regadíos gracias al agua almacenada en el sistema.

En contraste, la impulsión de Ojós presenta una distribución más sesgada, con una amplia brecha entre el valor mínimo y el máximo. Tal impulsión se encuentra mucho más condicionada por los recursos provenientes de los embalses de cabecera, a lo cual se asocia su variabilidad.

### 9.1.2. DESALADORAS DE AGUA DE MAR

A partir de los resultados históricos extraídos del PHDS se definieron las series de volúmenes de agua desalada en las diferentes instalaciones del sistema. En la *Tabla 12*, se exponen los caudales mínimos, medios y máximos a nivel mensual ( $\text{hm}^3/\text{mes}$ ) registrados en las series históricas del PHDS correspondientes al período octubre de 1980 a septiembre de 2012.

En la tabla también se incluye la capacidad de producción de cada una de las instalaciones y el porcentaje de generación de recurso en el período de tiempo evaluado.

Tabla 12. Caudales mensuales producidos por las IDAMS  
Información extraída de Modelo Aqutool-SIMGES, PHDS 2015/21

ID Desaladora EVALUADOR	NOMBRE	ABASTECIMIENTO				Capacidad de producción [ $\text{hm}^3/\text{mes}$ ]	Caudal [ $\text{hm}^3/\text{mes}$ ]			Porcentaje de máxima producción
		U	A	G	I		Min	Max	Medio	
ida01	Alicante I	x				3,26	0,09	3,26	1,89	100%
ida02	Alicante II	x				0,49	0,01	0,49	0,28	100%
ida03	San Pedro de Pinatar I	x			x	2,00	0,05	1,87	1,03	94%
ida04	San Pedro de Pinatar II	x			x	2,00	0,05	1,87	1,03	94%
ida05	Valdelentisco	x	x			4,17	0,00	4,17	2,57	100%
ida06	Águilas	x	x			5,00	4,75	4,75	4,75	95%
ida07	Torre vieja	x	x			6,67	0,13	6,67	1,78	100%
ida09	El Mojón		x			0,17	0,00	0,17	0,15	100%
ida10	Mazarrón		x			0,83	0,83	0,83	0,83	100%
ida12	Águilas Regadíes		x			0,33	0,03	0,33	0,25	99%
ida13	Escombreras		x	x		1,75	0,03	1,00	0,55	57%

\* Referencias tabla: U: abastecimiento urbano; A: abastecimiento agrario; I: abastecimiento industrial; G: abastecimiento campos de golf

En la tabla precedente, se han resaltado aquellas IDAMs de mayor capacidad de producción. En primer lugar, se encuentra la desaladora de Torre vieja, que es la que aporta el máximo al sistema. A ésta le siguen las desaladoras de Águilas, Valdelentisco y Alicante I, concentrando entre las cuatro instalaciones más del 70% del agua desalada en toda la DHS, hasta el año 2012.

Se debe mencionar que actualmente se encuentra en etapa de Proyecto la ampliación de la planta desaladora de Torre vieja en donde se propone elevar su capacidad a  $120 \text{ hm}^3/\text{año}$ .

En la siguiente gráfica se ha representado con línea de trazos capacidad de máxima de producción y en línea continua los caudales aportados al sistema de las cuatro desaladoras más importantes durante el período histórico.

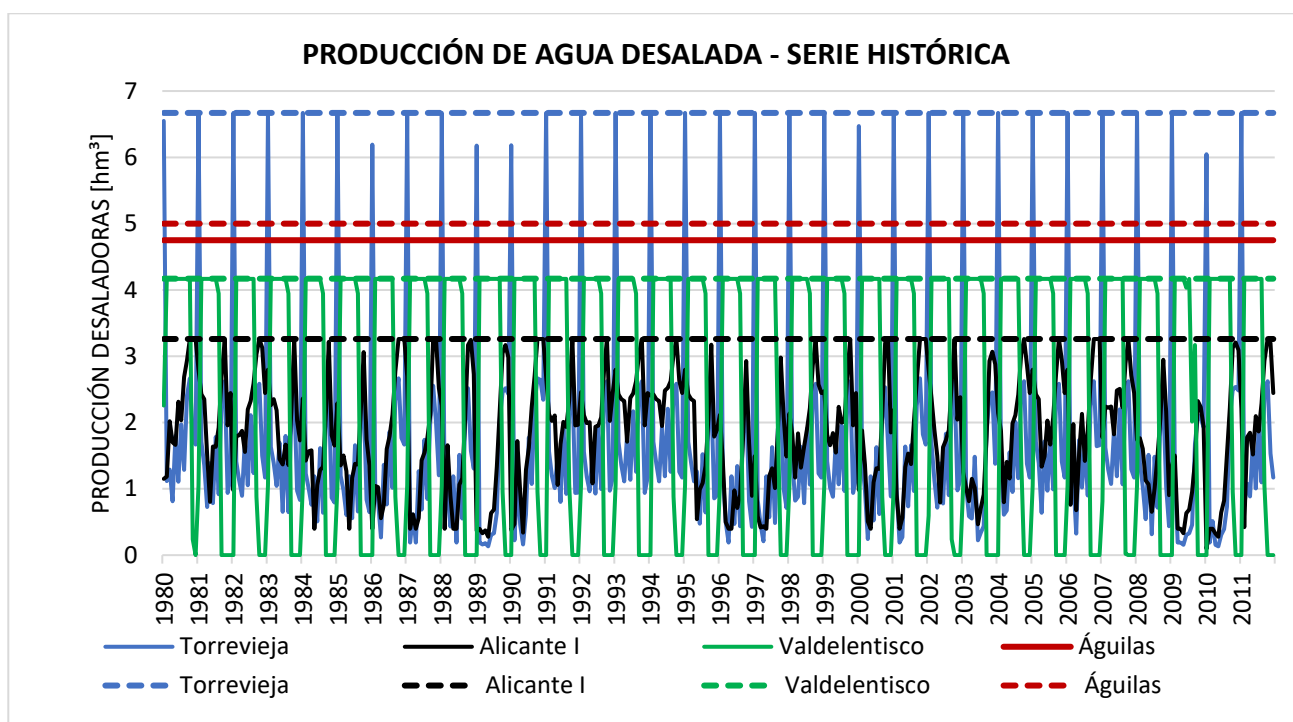


Gráfico 8. Producción de agua desalada. Serie histórica

En la gráfica se aprecia con claridad que la desaladora de Torrevieja es la de mayor capacidad de producción con aportes muy variables al sistema. Los mínimos ocurren en meses de invierno y los máximos generalmente en el mes de octubre, al comienzo de cada año hidrológico. En cambio, en la desaladora de Águilas, la producción es uniforme para todo el período evaluado, muy próxima a la capacidad máxima.

El coste de operación de las desaladoras es proporcional al caudal tratado y depende del equipamiento instalado en la IDAM. En el *Gráfico 9*, se exponen los costos de desalación obtenidos con el evaluador para la serie histórica.

Si bien se ha realizado la evaluación con valores mensuales, en el *Gráfico 9*, se han representado los valores de costes acumulados **anuales** de las desaladoras para una mayor claridad en la gráfica, ya que los costes de algunas de las IDAMs son muy variables y su representación en la gráfica no posibilitaba la comprensión sencilla de la información.

En concordancia con lo planteado en el *Gráfico 8*, las desaladoras de Águilas, Valdelentisco, Torrevieja y Alicante I son las de mayores costes y corresponden a las de mayor producción de agua desalada en el sistema.

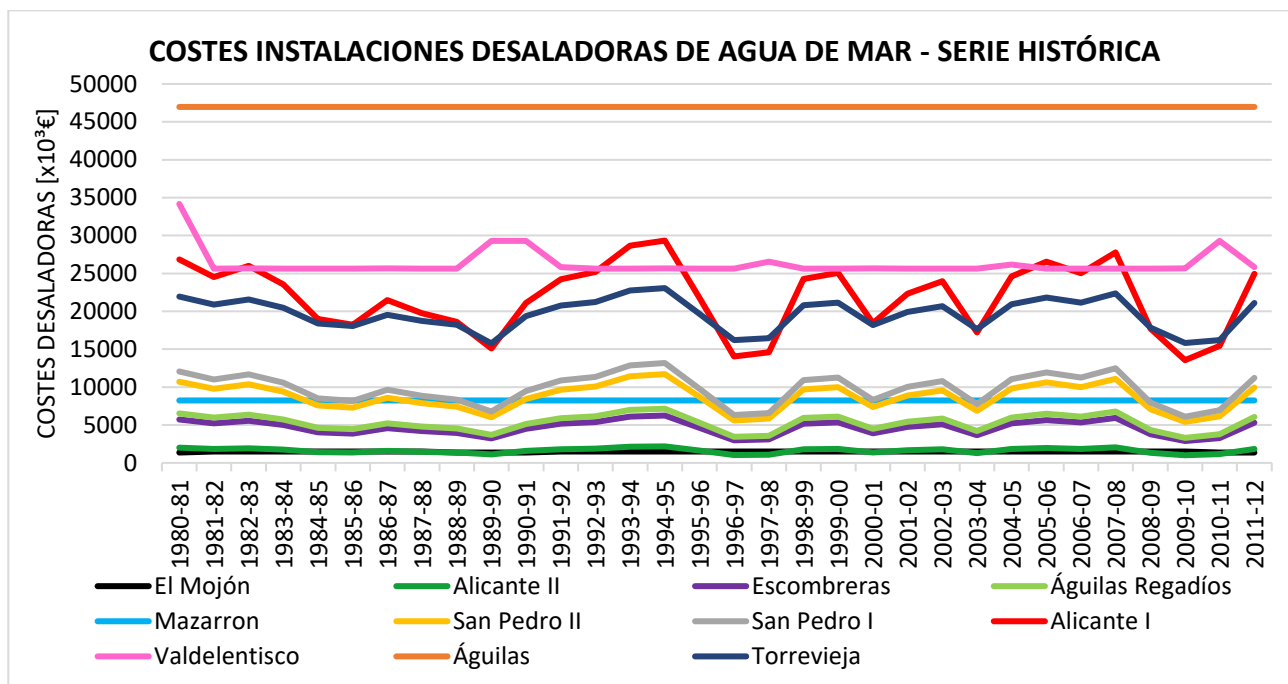


Gráfico 9. Costes acumulados anuales de desaladoras. Serie histórica

A continuación (Ver Gráfico 10), se incorporan gráficos apilados, en donde se aprecia la incidencia de cada una de las desaladoras en el coste total de desalación para el período histórico en estudio. Se puede observar que, en la mayor parte de la serie, la influencia es mayor por parte de las desaladoras Águilas y Valdelentisco. Este hecho recalca la relevancia de estas desaladoras al abastecer las **demandas agrícolas** de la parte baja de la cuenca y el considerable aporte de recursos a la DHS.

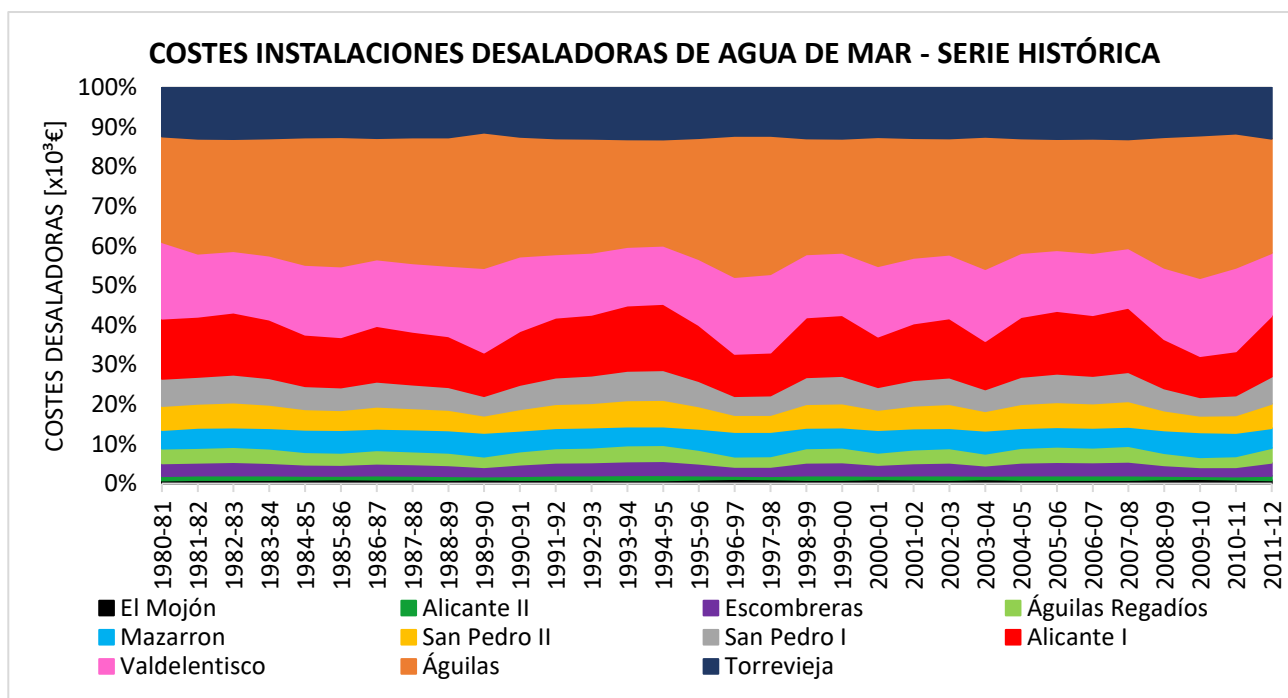


Gráfico 10. Costes porcentuales de desaladoras. Serie histórica

En la siguiente tabla, se expone de forma resumida los resultados de costes de desalación obtenidos para la serie histórica y el coste unitario resultante para cada una.

Tabla 13. Resumen costes mensuales de desaladoras de agua de mar. Serie histórica

DESALADORAS	COSTES [x10 <sup>3</sup> €/mes]						Coste unitario [€/m <sup>3</sup> ]
	MIN	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	MAX	PROMEDIO	
El Mojón	0,00	136,35	136,35	136,35	136,35	122,86	<b>0,996</b>
Alicante II	6,70	92,62	138,27	173,16	246,68	134,91	<b>0,579</b>
Escombreras	19,24	266,11	397,27	497,50	708,75	387,61	<b>0,865</b>
Águilas Regadíos	22,02	304,44	454,48	569,14	810,81	443,42	<b>0,989</b>
Mazarrón	686,43	686,43	686,43	686,43	686,43	686,43	<b>1,006</b>
San Pedro de Pinatar II	36,08	498,97	744,88	932,81	1328,91	726,76	<b>0,865</b>
San Pedro de Pinatar I	40,61	561,50	838,24	1049,72	1495,46	817,85	<b>0,974</b>
Torre vieja	119,28	803,00	1168,91	1832,81	6832,34	1637,04	<b>1,096</b>
Alicante I	90,37	1249,59	1865,46	2336,09	3328,06	1820,08	<b>1,167</b>
Valdelentisco	0,00	0,00	3559,78	3559,78	3559,78	2191,98	<b>1,042</b>
Águilas	<b>3914,19</b>	<b>3914,19</b>	<b>3914,19</b>	<b>3914,19</b>	<b>3914,19</b>	<b>3914,19</b>	<b>1,006</b>

De las cuatro desaladoras de mayor producción, la desaladora Águilas resulta ser la de mayor eficiencia económica, ya que es la de menor coste de producción por m<sup>3</sup> de agua desalada, resultando 1,006 €/m<sup>3</sup>. Pero, al extender este análisis al total de las desaladoras, resulta de mayor eficiencia la IDAM de Alicante II, cuyo coste de producción unitario es tan solo 0,579 €/m, lo cual está relacionado con los equipamientos y la tecnología instalada en la IDAM.

De la tabla se concluye que los costos mensuales varían notablemente entre las desaladoras. Por ejemplo, El Mojón tienen costos consistentes en todos los percentiles, mientras Torre vieja y Valdelentisco presentan gran variabilidad entre sus mínimos y máximos, lo cual está asociado a la producción de agua desalada de cada instalación en el período de tiempo analizado.

Las desaladoras que únicamente abastecen a regadíos, como, por ejemplo, Mazarrón y Águilas, tienen costos constantes en todos los percentiles, lo que sugiere que su producción también lo es. En cambio, San Pedro de Pinatar II y Torre vieja que abastecen demandas urbanas, muestran una variabilidad considerable a nivel diario y estacional, vinculado con la actividad turística de la región en análisis.

Puntualmente en la desaladora de Torre vieja (mayor capacidad de todo el sistema), se aprecia que el percentil 75 corresponde a un coste de operación próximo al 30% del total. Este hecho representa que, de todo el período evaluado, en menos del 25% de meses la producción de agua desalada estuvo próxima a la capacidad máxima de la IDAM, permaneciendo en parte fuera de operación.



### 9.1.3. BOMBEO SUBTERRÁNEOS PARA SUMINISTRO DE DEMANDAS AGRARIAS

Para la estimación de costes de bombeo en el período histórico se cuenta con la información de caudales bombeados de cada acuífero, volúmenes de acuíferos y las regresiones que relacionan volumen de acuífero/altura de bombeo presentadas en el *Apartado 7.4 “BOMBEO PARA SUMINISTRO DE DEMANDAS AGRARIAS”*

Entre la información recopilada en el proyecto SIAGES, se encuentra la distribución porcentual de caudales bombeados por cada una de las masas subterráneas, la cual se ha adoptado para distribuir los caudales adecuadamente. Los datos de volúmenes de acuíferos se han empleado para estimar las alturas de bombeo, a partir de las relaciones previamente citadas para cada pozo de bombeo. Luego, se agruparon los costes de bombeo por masa subterránea para llegar a valores más representativos.

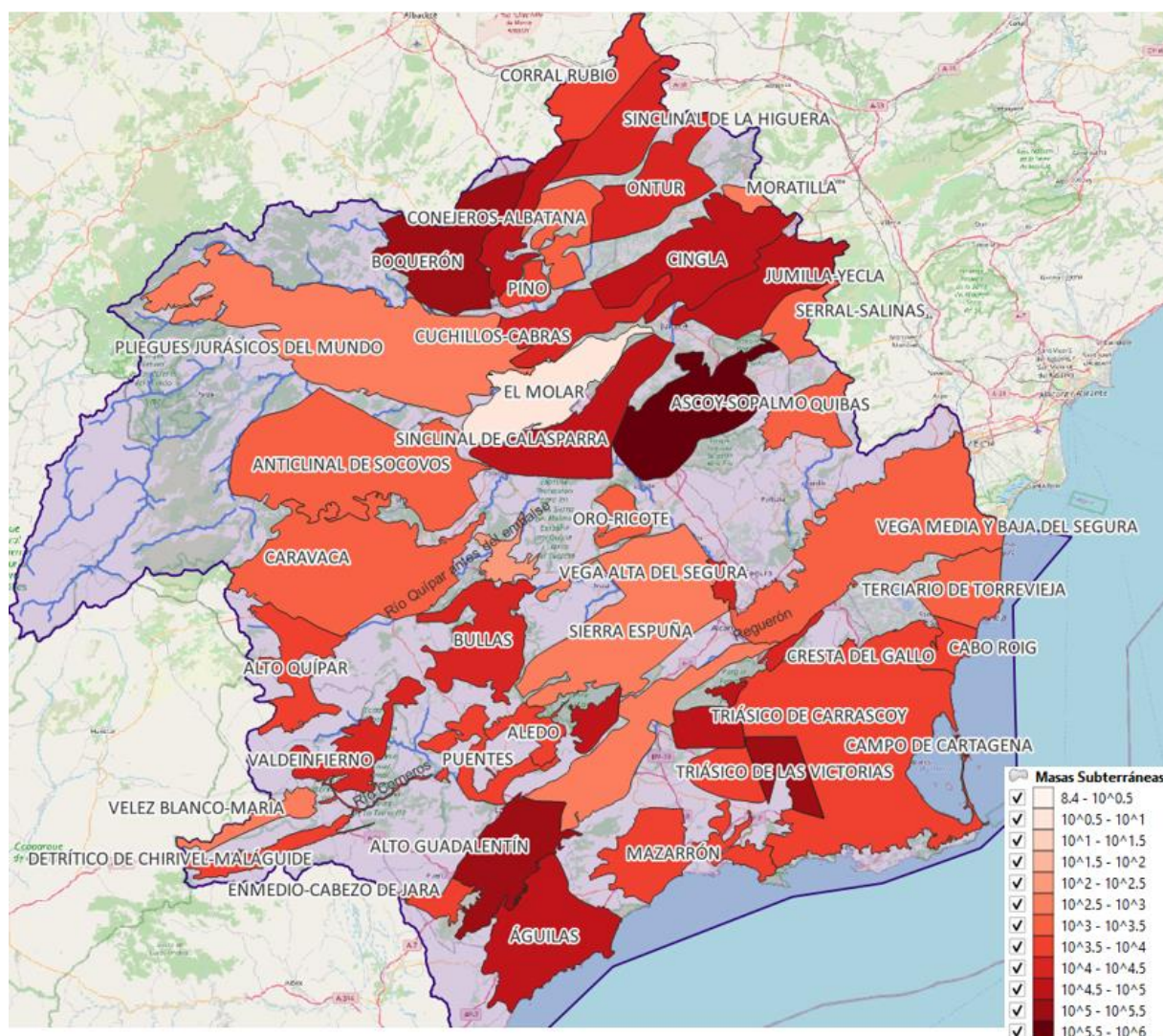


Ilustración 12. Costes de operación en bombeos de aguas subterráneas para riego. Serie histórica  
 (\*) Colores más oscuros representan mayores costes

En el esquema de la *Ilustración 12* se han representado con un mapa de calor los volúmenes de bombeo desde cada masa de agua subterránea. Se aprecia que el mayor bombeo se centra en la masa subterránea Ascoy-Sopalmo, seguida por Alto Guadalentín y Boquerón. Lo obtenido por medio del evaluador para la serie histórica, coincide con lo publicado en la Tabla 16 del Anejo 2 del PHDS (2022/27) “Recursos disponibles en las masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrográfica del Segura” en donde se expresa que la masa de Ascoy-Sopalmo es la masa con mayor índice de explotación de toda la demarcación, índice que relaciona el volumen de agua extraído con el recurso disponible en el acuífero.

A continuación, se expone tabla con resumen de resultados por masa de agua subterránea, en donde se presentan con más detalles los resultados obtenidos en la simulación histórica. Se han representado en negrita las tres masas de agua subterránea identificadas con mayores costes de bombeos.

Tabla 14. Resumen costes de bombeos para suministro de demandas agrarias. Serie histórica

MASA AGUA SUBTERRÁNEA		COSTES [x10 <sup>3</sup> €/mes]					
		MIN	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	MAX	PROMEDIO
70001	CORRAL RUBIO	0,19	2,30	5,70	14,38	28,09	8,51
70002	SINCLINAL DE LA HIGUERA	1,39	15,99	37,55	95,91	178,13	56,57
70004	<b>BOQUERÓN</b>	<b>3,43</b>	<b>17,24</b>	<b>74,85</b>	<b>400,19</b>	<b>1939,64</b>	<b>383,61</b>
70005	TOBARRA-TEDERA-PINILLA	2,36	11,14	45,47	194,05	758,78	174,72
70006	PINO	0,20	0,98	3,91	15,60	51,84	12,63
70007	CONEJEROS-ALBATANA	0,10	1,30	4,23	10,27	25,48	6,39
70008	ONTUR	1,12	12,68	28,08	73,43	130,22	43,30
70010	PLIEGUES JURÁSICOS DEL MUNDO	0,00	0,00	0,00	0,00	20,94	1,93
70011	CUCHILLOS-CABRAS	9,65	18,44	63,49	116,36	253,96	75,63
70012	CINGLA	15,29	29,66	107,65	212,08	495,35	138,67
70013	MORATILLA	0,30	0,53	1,54	2,64	5,08	1,82
70020	ANTICLINAL DE SOCOVOS	0,00	0,00	1,88	8,51	55,42	6,82
70021	EL MOLAR	0,00	0,00	0,00	0,00	3,39	0,02
70022	SINCLINAL DE CALASPARRA	0,00	0,00	142,28	283,60	468,54	177,08
70023	JUMILLA-YECLA	9,32	28,48	96,10	178,94	524,93	124,36
70025	<b>ASCOY-SOPALMO</b>	<b>21,15</b>	<b>38,83</b>	<b>600,65</b>	<b>2228,80</b>	<b>4807,64</b>	<b>1217,99</b>
70027	SERRAL-SALINAS	0,33	0,52	2,36	7,05	16,00	4,11
70029	QUIBAS	0,00	0,00	0,00	0,00	26,10	3,06
70032	CARAVACA	0,00	0,00	0,99	6,16	18,88	3,39
70033	BAJO QUÍPAR	0,00	0,00	0,11	0,43	1,84	0,29
70034	ORO-RICOTE	0,00	0,00	0,15	6,83	25,07	5,66
70036	VEGA MEDIA Y BAJA DEL SEGURA	6,53	6,54	6,55	8,99	11,64	7,80
70038	ALTO QUÍPAR	0,00	0,00	0,00	0,00	104,61	10,64
70039	BULLAS	0,00	0,70	15,78	63,92	268,31	44,27
70040	SIERRA ESPUÑA	0,00	0,00	0,03	1,37	5,00	1,13
70041	VEGA ALTA DEL SEGURA	20,47	21,27	28,03	44,89	199,80	56,23
70042	TERCIARIO DE TORREVIEJA	0,24	2,26	8,49	10,48	17,54	7,33
70043	VALDEINFIERNO	0,00	0,00	0,00	61,04	149,07	37,37

MASA AGUA SUBTERRÁNEA		COSTES [x10 <sup>3</sup> €/mes]					
		MIN	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	MAX	PROMEDIO
70044	VELEZ BLANCO-MARIA	0,00	0,00	0,00	3,33	7,88	2,01
70045	DETRÍTICO DE CHIRIVEL-MALÁGUIDE	0,00	0,00	0,00	32,62	85,21	20,66
70046	PUENTES	0,00	0,00	0,00	33,52	89,55	20,91
70048	SANTA-YÉCHAR	0,00	0,00	54,68	294,02	364,44	137,33
70049	ALEDO	0,00	0,00	7,44	31,60	56,25	16,19
70050	BAJO GUADALENTÍN	0,00	0,00	0,00	4,23	6,16	1,62
70051	CRESTA DEL GALLO	59,92	60,04	60,70	84,58	110,19	72,67
70052	CAMPO DE CARTAGENA	0,71	6,22	27,38	37,36	65,56	25,18
70053	CABO ROIG	0,41	3,91	16,32	21,29	40,15	14,95
70054	TRIÁSICO DE LAS VICTORIAS	21,96	207,15	812,98	1066,36	1929,69	741,32
70055	TRIÁSICO DE CARRASCOY	2,18	23,74	91,46	126,86	244,64	86,21
70057	<b>ALTO GUADALENTÍN</b>	<b>0,00</b>	<b>0,00</b>	<b>86,16</b>	<b>610,80</b>	<b>2195,81</b>	<b>396,75</b>
70058	MAZARRÓN	1,25	1,44	15,75	40,06	72,72	22,89
70059	ENMEDIO-CABEZO DE JARA	0,47	1,65	13,10	32,13	100,87	21,69
70061	ÁGUILAS	5,99	6,05	66,26	193,83	347,56	101,80

De la tabla precedente se concluye que la masa de agua subterránea de **Ascoy-Sopalmo** es la de mayor sobreexplotación en toda la demarcación. Esta masa está ubicada en el centro-este de la cuenca y abastece principalmente a la UDA 03 “Regadíos del Ascoy-Sopalmo”. Según la Tabla 15 “Origen de los recursos hídricos para cada Unidad de Demanda Agraria en la DHS” del Anejo 03 del PHDS (2015/21), esta unidad de demanda agraria tiene como origen principal del recurso las aguas subterráneas y como secundarios la reutilización directa de aguas depuradas. No recibe aportes del ATS, ni cuenta con recursos superficiales, lo cual justifica la sobreexplotación de agua subterránea resultante de la evaluación.

En contrapartida, la masa subterránea de **Bajo Quípar** resulta ser una de las de menor coste de explotación por bombeos de aguas subterráneas. Geográficamente se vincula con la UDA 31 “Cabecera del Quípar”, quien tiene como origen principal del recurso aguas superficiales, resultando las aguas subterráneas un recurso secundario.

#### 9.1.4. CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Para la estimación de beneficios de centrales hidroeléctricas en el período histórico se han empleado datos de sueltas y volúmenes de embalse para las centrales ubicadas en “*pie de presa*” y caudales en conducciones para aquellas hidroeléctricas tipo “*fluyentes*”. La diferencia entre estas se ha definido en el apartado 7.5 “CENTRALES HIDROELÉCTRICAS”.

En el modelo disponible de Aquatool-SIMGES tomado como base no se encuentran incluidos los tramos de conducciones correspondientes a las centrales hidroeléctricas Miller Zumeta y Miller Segura, motivo por el cual no se tendrán en cuenta en la siguiente evaluación. En la siguiente tabla se presentan los caudales a turbinar de las 6 centrales hidroeléctricas que se analizarán en el período octubre de 1980 a septiembre de 2012.

Tabla 15. Caudales a turbinar centrales hidroeléctricas.  
 Información extraída de Modelo Aquatool-SIMGES, PHDS 2015/21

ID EVALUADOR	NOMBRE	Tipo	Caudal máximo [m <sup>3</sup> /s]	Caudal [hm <sup>3</sup> /mes]		
				Max	Min	Media
chn01	Fontanar I	Fluyente	25	37,34	4,80	25,42
chn02	Fontanar II	Fluyente	25	37,34	4,80	25,42
chn03	Fontanar III	Fluyente	25	37,34	4,80	25,42
chn05	Almadenes	Fluyente	25	169,43	5,52	53,26
chn07	Talave	Pie de presa	14	53,17	3,00	30,52
chn08	Fuensanta	Pie de presa	14	124,09	0,00	16,80

En el *Gráfico 11*, se aprecia que la central hidroeléctrica de Almadenes es la que genera mayores beneficios, lo cual está directamente relacionado a que es la que mayor caudal turbinada y dispone de mayor eficiencia en sus instalaciones (Ver *Tabla 8*).

En el mismo gráfico también se aprecia que el beneficio económico generado por las centrales hidroeléctricas Fontanar I, II y III, es uniforme e igual al máximo que puede generar, a excepción del período 1994-95. Estas centrales se encuentran instaladas en la infraestructura del trasvase Tajo-Segura y como se expresó en el apartado 9.1.1 “IMPULSIONES EN SISTEMA SUPERFICIAL” en tal año hidrológico ocurrió una fuerte sequía en la península Ibérica que condicionó el trasvase de recursos hacia la DHS.

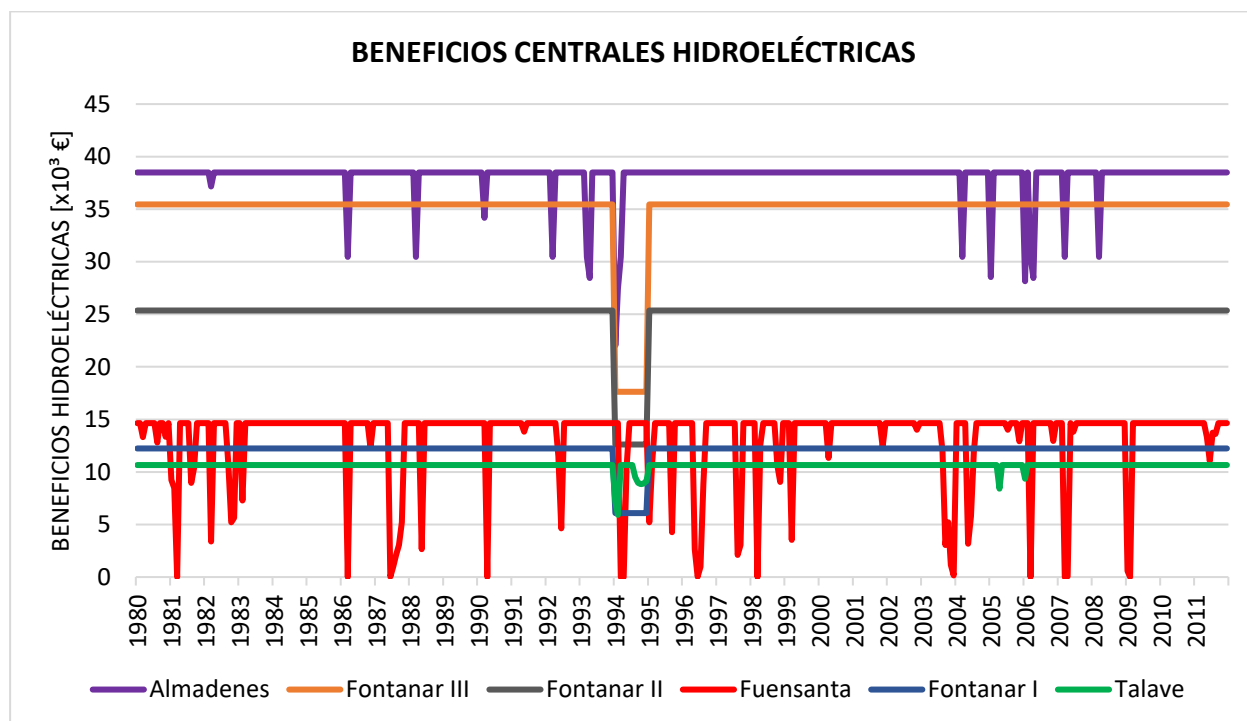


Gráfico 11. Beneficios mensuales centrales hidroeléctricas. Serie histórica

Por su parte, el beneficio de las centrales Fuensanta y Talave es mucho más variable. Esto se asocia a que son centrales ubicadas a pie de presa y la energía que se genera depende del volumen almacenado en los embalses asociados.

En la siguiente tabla, se presenta el resumen de resultados mensuales de beneficios de centrales hidroeléctricas en miles de euros para el período histórico.

Tabla 16. Resumen beneficios mensuales centrales hidroeléctricas. Serie histórica

CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	BENEFICIOS [ $\times 10^3$ €/mes]					
	MIN	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	MAX	PROMEDIO
Almadenes	22,03	38,49	38,49	38,49	38,49	38,11
Fontanar III	17,63	35,45	35,45	35,45	35,45	34,90
Fontanar II	12,61	25,36	25,36	25,36	25,36	24,96
Talave	5,92	10,66	10,66	10,66	10,66	10,61
Fuensanta	0,00	14,65	14,65	14,65	14,65	13,26
Fontanar I	6,08	12,24	12,24	12,24	12,24	12,04

De la tabla, se desprende que en todas las centrales hidroeléctricas la variabilidad es baja ya que todos los percentiles son iguales, lo que representa un comportamiento estable. Almadenes y Fontanar III son las que generan mayores beneficios y coinciden con presentar mayor potencia instalada de las 6 analizadas pertenecientes a la DHS.

### 9.1.5. COSTES ACUMULADOS IMPULSIONES, DESALADORAS Y BOMBEO

Para analizar la relación entre los costes de operación de desaladoras, impulsiones y bombes, se ha propuesto un diagrama de áreas apiladas (ver *Gráfico 12*), en donde se demuestra que porcentaje de afectación representa cada uno de los elementos respecto del coste total de operación estimado.

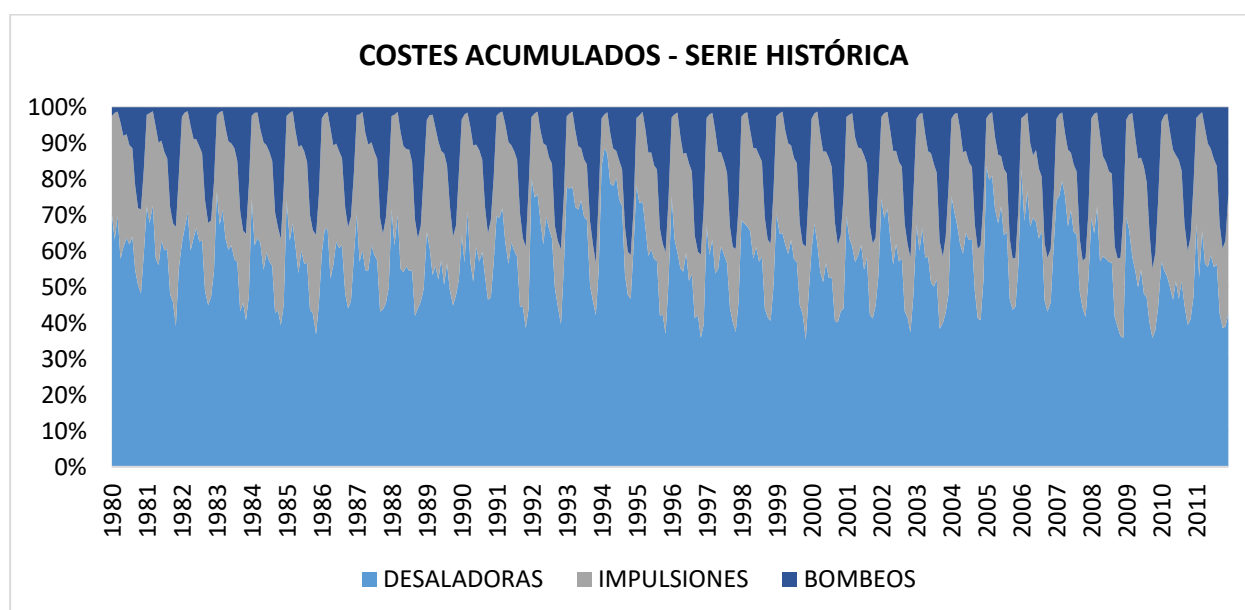


Gráfico 12. Costes porcentuales de desaladoras, impulsiones y bombes. Serie histórica

Se aprecia con notoriedad que el coste más importante es el de las **desaladoras de agua de mar**, que representa en promedio el 57% del coste total en todo el período histórico analizado. El pico máximo ocurre en los meses de noviembre y diciembre de 1994 con un valor del 88% del coste total de operación, que coincide con el período en el cual no se produjeron trasvases de recursos mencionados en apartados precedentes.

En segundo orden de importancia se encuentran las **impulsiones en el sistema superficial** con un coste promedio del 27% y finalmente los bombeos promedian el 13%. Este último dato, en parte justifica la sobreexplotación de masas subterráneas que existe en la demarcación.

### 9.1.6. RELACIÓN ENTRE APORTACIONES AL SISTEMA Y VARIACIÓN COSTES OPERACIÓN

El evaluador desarrollado, también posibilita analizar la relación que existe entre aportaciones superficiales en el sistema y variación de costes de operación.

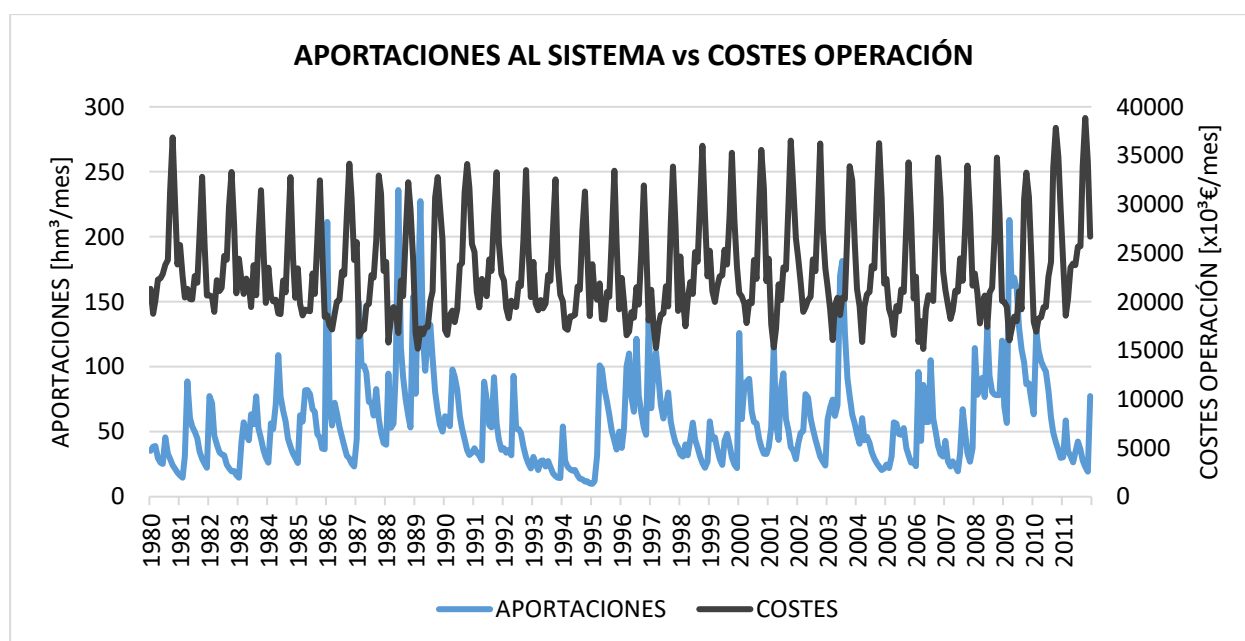
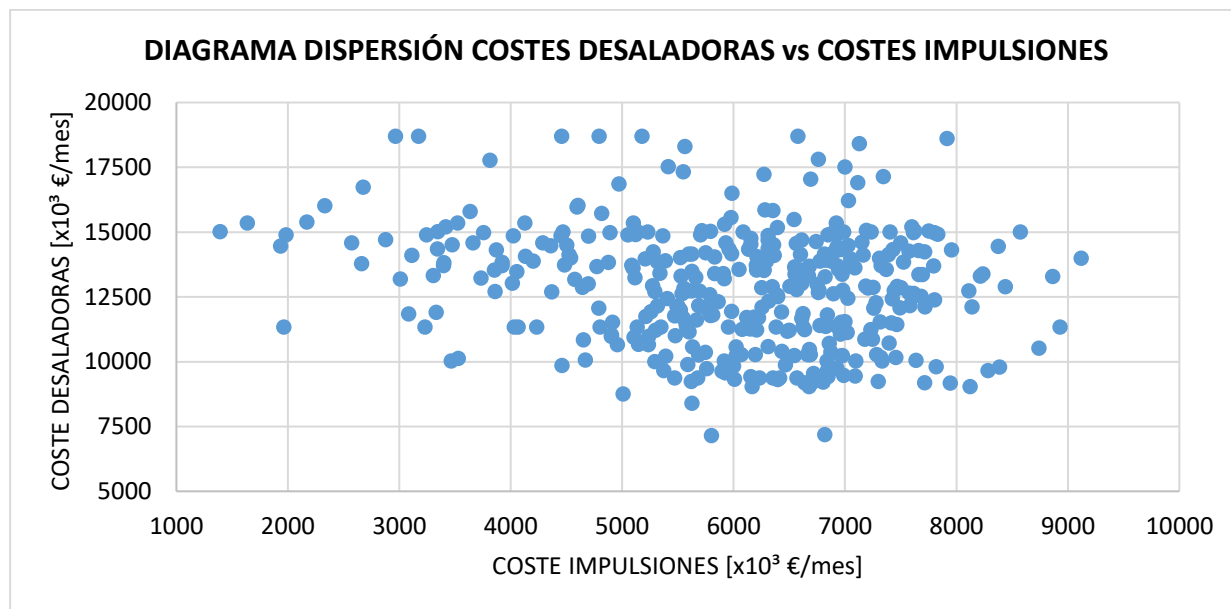


Gráfico 13. Aportaciones y costes de operación SRH. Serie histórica

En el *Gráfico 13* se puede apreciar que los picos de ambas gráficas están desfasados en el tiempo, es decir que los máximos de los costes de operación coinciden con mínimos en aportaciones superficiales. Este resultado tiene lógica, ya que representa que se tienen mayores costes de operación asociados a la generación de recursos ya sea por desalación o bombeos ante la falta de recursos superficiales disponibles en el sistema.

### 9.1.7. RELACIÓN ENTRE COSTES DESALADORAS Y COSTES IMPULSIONES

Se ha analizado también la relación entre costes de desalación y costes de impulsiones en el sistema superficial por medio de un **diagrama de dispersión** (ver *Gráfico 14*).



*Gráfico 14.* Diagrama de dispersión entre costes de desaladoras e impulsiones. Serie histórica

En la gráfica se aprecia que, si bien hay una leve tendencia que a mayor coste de operación asociado a impulsiones es menor el coste de desalación, existe demasiada dispersión en el gráfico que no permite concluir que haya algún tipo de relación entre los costes de operación de estos elementos.

## 9.2. RESULTADOS SIMULACIÓN ENTORNO SIAGES PERÍODO ESTACIONAL

En este apartado se presentarán los resultados obtenidos en el entorno del proyecto SIAGES para el escenario **período estacional** descrito en el Capítulo 8 “RESUMEN ESCENARIOS SIMULADOS”.

La ventaja de lo propuesto en el proyecto SIAGES es una herramienta de soporte para la **toma de decisiones en tiempo real** ya que los datos de las simulaciones provienen de predicciones meteorológicas. A continuación, se evaluarán los resultados, aplicando la metodología de análisis que puede ser extrapolada a otros costes de operación y a otras cuencas de estudio.

De líneas de trabajo precedentes en el entorno SIAGES, se extraen datos de caudales, volúmenes y niveles piezométricos que se introducirán en los evaluadores con el fin de estimar los costes y beneficios de operación. Es importante resaltar que, al ser un período corto, los resultados obtenidos dependen de las condiciones iniciales consideradas en cada uno de los modelos matemáticos que forman parte del proyecto.

Los resultados presentados corresponden a datos de **simulación de gestión**, siendo la primer opción de procesamiento de datos en el entorno de SIAGES. En aquellos gráficos que no se indica el tipo de trayectoria que se está analizando se considera únicamente la **Trayectoria determinista del modelo**.

### 9.2.1. IMPULSIONES EN SISTEMA SUPERFICIAL

En primer lugar, se evalúan las impulsiones en el sistema superficial. Todas ellas corresponden al acueducto Tajo-Segura y ya han sido desarrolladas en el capítulo 7.1 “**IMPULSIONES EN EL SISTEMA SUPERFICIAL**”, en donde se detallan las características de cada una de ellas que han sido introducidas en el evaluador hidroeconómico: altura de impulsión, consumo energético, coste de energía, entre otros.

En el *Gráfico 15*, se presentan los resultados de costes semanales en miles de euros de impulsiones en el sistema superficial para los caudales resultantes en el entorno de SIAGES, para un período de 7 meses previstos desde noviembre de 2022.

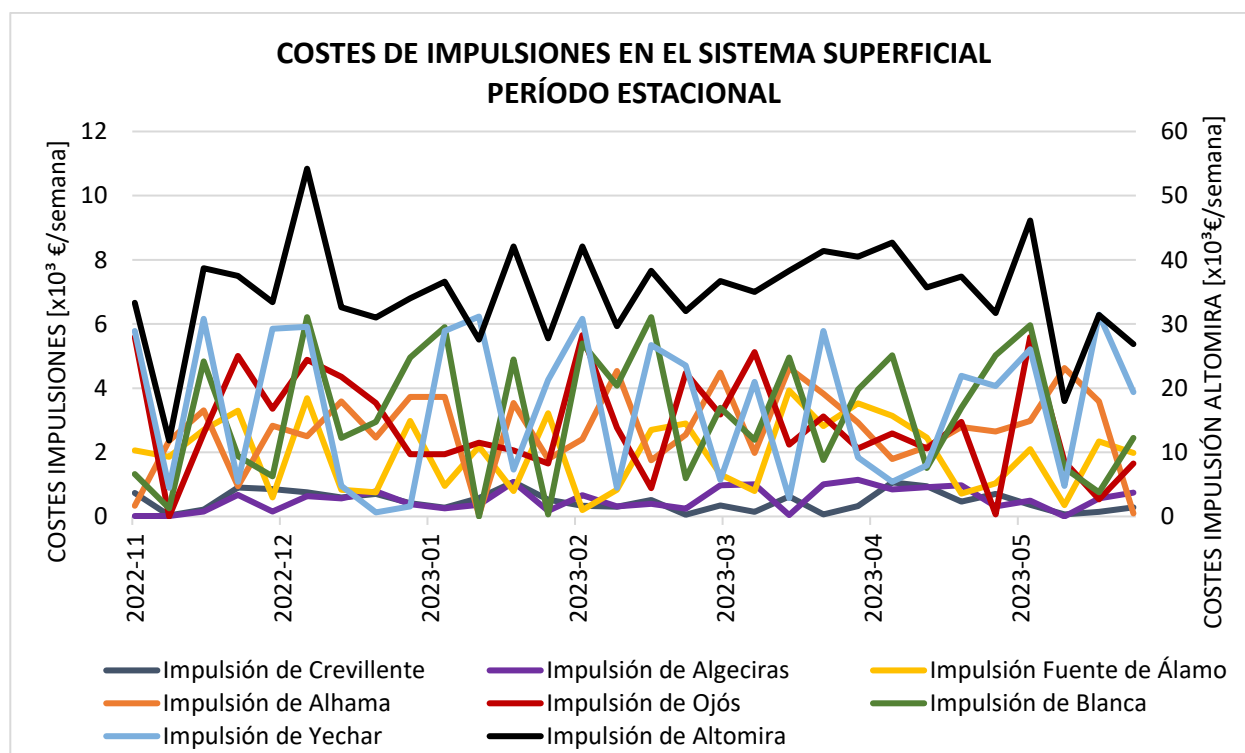


Gráfico 15. Costes semanales de impulsiones. Entorno SIAGES - período estacional

Como ocurrió en la simulación con datos históricos, el coste de la impulsión de Altomira es considerablemente mayor a las demás, debido a que se encuentra en el tramo inicial y contempla la totalidad del caudal trasvasado. Se ha graficado con respecto a un eje independiente indicado a la derecha del esquema, para permitir que se aprecien con mayor claridad los costes de las restantes impulsiones.



Las series graficadas corresponden a valores semanales, en donde se aprecia mucha variabilidad y contrasta con los valores de costes anuales de la serie histórica en que gran parte eran constantes. Lo observado, se expresa con mayor claridad en la siguiente tabla en donde los percentiles, mínimos y máximos difieren para todas las impulsiones.

Tabla 17. Resumen de costes semanales de impulsiones. Entorno SIAGES - período estacional

IMPULSIONES	Ubicación	COSTES [ $\times 10^3$ €/semana]					
		MIN	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	MAX	PROMEDIO
Impulsión de Crevillente	CPMI	0,03	0,27	0,44	0,70	1,07	0,48
Impulsión de Algeciras	CPMD	0,00	0,25	0,53	0,83	1,14	0,53
Impulsión Fuente de Álamo	CPMI	0,20	0,83	2,08	2,88	3,93	1,97
Impulsión de Alhama	CPMD	0,05	2,03	2,72	3,59	4,63	2,70
Impulsión de Ojós	CPMD	0,00	1,94	2,59	4,15	5,65	2,87
Impulsión de Blanca	Postrasvase	0,00	1,51	3,17	4,96	6,21	3,20
Impulsión de Yechar	CPMD	0,13	1,08	4,13	5,78	6,29	3,43
Impulsión de Altomira	ATS	11,83	31,50	35,35	38,59	54,20	34,81

Las impulsiones de Crevillente (CPMI) y Algeciras (CPMD) son las de mínimos costes de operación, y corresponden a las dos impulsiones de menor altura de elevación y consumo energético del sistema estudiado. En contrapartida, la impulsión de Altomira (ATS) es la de mayor coste, alcanza un máximo de más de 50mil euros semanales, corresponde al bombeo de mayor caudal y mayor altura de elevación del sistema en análisis.

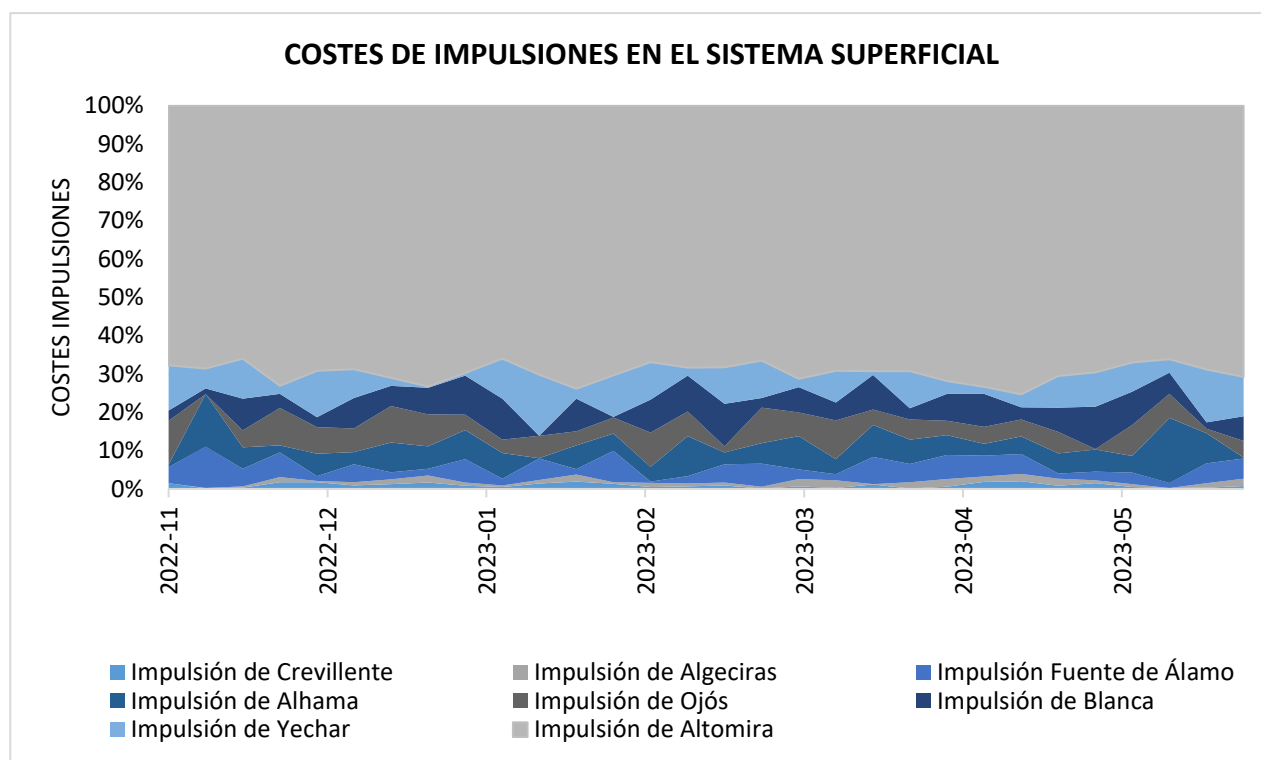


Gráfico 16. Valores porcentuales de costes impulsiones. Entorno SIAGES - período estacional

En la gráfica se ha representado el porcentaje de incidencia de cada una de las impulsiones respecto al coste total para el período estacional simulado, en donde, nuevamente, se aprecia con claridad la alta incidencia de la impulsión Altomira sobre el resto del sistema.

### 9.2.2. INSTALACIONES DESALADORAS DE AGUA DE MAR

En el presente apartado se exponen los resultados en el entorno SIAGES de los costes de operación de instalaciones desaladoras de agua de mar.

Las caracterización de las IDAMs se ha expuesto en el capítulo 7.2 “INSTALACIONES DESALADORAS DE AGUA DE MAR” y los caudales desalados corresponden a los resultantes de la simulación en el entorno SIAGES a partir de predicciones para 7 meses desde noviembre de 2022. En la tabla siguiente se exponen directamente los resultados de costes de operación de las IDAMs procesadas con el evaluador hidroeconómico.

Tabla 18. Resumen de costes semanales de desaladoras. Entorno SIAGES - período estacional

DESALADORAS	COSTES [x10 <sup>3</sup> €/semana]					
	MIN	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	MAX	PROMEDIO
San Pedro del Pinatar II	0,00	7,56	15,12	23,55	31,73	15,91
C.R. Águilas	4,61	25,67	36,05	53,21	70,95	38,57
C.R. Marina de Cope	0,00	24,13	55,05	69,82	85,14	47,20
Escombreras	0,50	25,16	57,76	77,47	111,06	54,22
Alicante I	13,39	64,25	119,80	151,43	214,17	108,80
El Mojón	3,43	61,99	181,68	274,52	411,92	187,03
Cuencas Mediterráneas Andaluzas	5,71	92,13	187,96	278,80	379,36	191,43
Mazarrón	12,69	63,30	153,43	330,08	444,14	193,02
Águilas	14,17	178,86	236,68	305,84	378,12	223,85
Torre vieja	2,51	147,32	196,01	288,67	453,59	227,09
Alicante II	16,28	207,29	336,18	484,10	608,59	344,07
San Pedro del Pinatar I	27,91	256,07	480,33	597,55	894,79	463,92
Valdelentisco	23,31	308,64	601,75	996,29	1451,49	655,43

En los valores expuestos en la Tabla 18 se aprecian resultados muy dispares entre las distintas instalaciones desaladoras de agua de mar. La principal diferencia con la serie histórica antes presentada es que ninguna de ellas presenta coste semanal constante.

Las desaladoras de San Pedro de Pinatar II (abastecimiento urbano e industrial) y Águilas Regadíos (abastecimiento agrario) resultan ser las de menor coste de operación para el período estudiado.

Por otro lado, las desaladoras de San Pedro de Pinatar I y Valdelentisco resultan ser las de mayor coste de operación, para los 7 meses de predicción propuestos. Ambas desaladoras se emplean para abastecer demandas urbanas y agrarias, que son las de mayor importancia en la gestión de recursos de la demarcación.

Es necesario señalar que en el escenario simulación de gestión a partir de predicciones para período estacional las desaladoras de Torrevieja, Águilas y Alicante I se encuentran produciendo a niveles muy bajos de acuerdo con su capacidad instalada.

En el *Gráfico 17*, se representa el porcentaje de incidencia de cada IDAM sobre el coste total de operación para los 7 meses analizados. En la simulación analizada los resultados son muy variables, hay semanas que la instalación de mayor incidencia es Valdelentisco, pero en otros momentos lo es San Pedro de Pinatar I o Alicante II. Las tres IDAMs mencionadas corresponden a las de mayor producción para el escenario planteado.

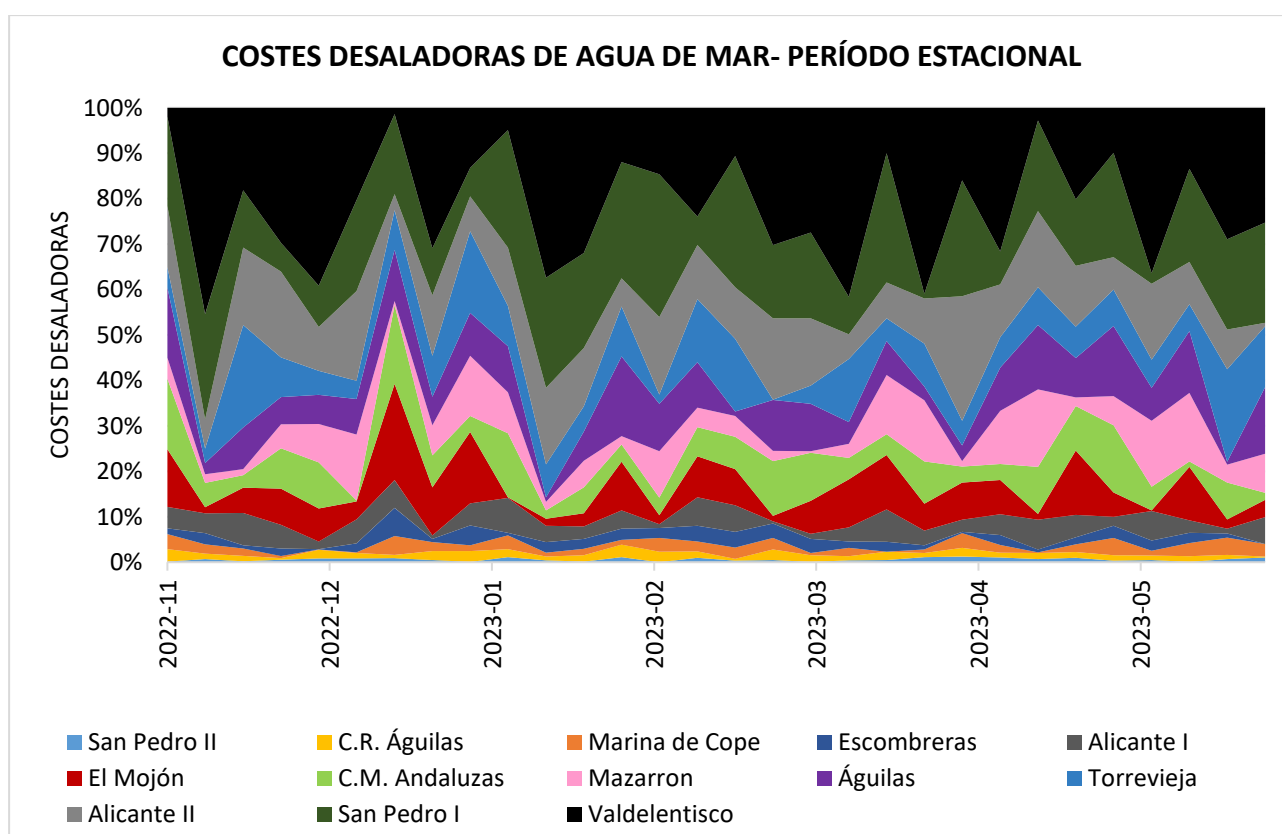


Gráfico 17. Valores porcentuales de costes desaladoras. Entorno SIAGES - período estacional

### 9.2.3. DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES

A continuación, se presentan los resultados de la simulación en período estacional de costes de operación de estaciones depuradoras de aguas residuales.

En el modelo se han incluido únicamente aquellas estaciones que cuentan en su proceso de depuración tratamientos terciarios que permiten la reutilización del recurso, las cuales han sido detalladas en el capítulo 7.3 “ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES”.

El recurso proveniente de las depuradoras proviene de resultado de simulación de gestión en entorno de SIAGES para período estacional. En la tabla siguiente se presentan los costes de operación obtenidos por medio del evaluador en miles de euros semanales.

Tabla 19. Resumen de costes semanales de depuradoras. Entorno SIAGES - período estacional

EDAR	COSTES [ $\times 10^3$ €/semana]					
	MIN	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	MAX	PROMEDIO
Benejúzar	0,16	1,15	4,67	6,31	8,85	4,06
Orihuela	0,15	3,86	7,41	10,78	15,57	7,26
Moratalla	0,81	7,84	13,56	20,26	24,03	13,39
Abarán	2,09	10,60	21,20	32,61	43,37	21,47
Hellín	2,30	12,59	37,97	71,73	99,36	43,90
Cieza	6,41	23,95	47,21	60,56	93,66	45,60
Calasparra	0,46	27,64	46,15	65,20	90,60	46,74
Caravaca	1,55	34,44	49,43	62,60	84,30	48,59
Archena	1,22	38,30	74,29	147,71	209,95	89,58
Algorfa	41,28	96,32	130,32	228,57	291,27	153,83

La EDAR de Algorfa es la que mayores costes de operación en el sistema representa y es también la de mayor consumo energético de todas las depuradoras incluidas en el evaluador. La siguen las depuradoras de Archena y Caravaca, que su consumo energético es medio, pero las tres son las que mayores recursos depurados aportan al sistema.

Geográficamente, la EDAR Algorfa se ubica próxima a la UDA 46 “Tradicional Vega Baja” en donde la reutilización directa e indirecta de aguas depuradas ocupa el segundo lugar en aportes de recursos para satisfacción de demandas agrarias según la Tabla 15 “Origen de los recursos hídricos para cada Unidad de Demanda Agraria en la DHS” del Anejo 03 del PHDS (2015/21). Lo mismo sucede con la EDAR Archena y su cercanía con la UDA 20 “Tradicional Vega Alta, Ojós-Contraparada” y la EDAR Caravaca con la UDA 28 “Cabecera del Argos”

En el gráfico siguiente, se puede apreciar la influencia porcentual de cada una de las estaciones depuradoras sobre el coste total de operación, en donde se destacan Algorfa, Archena y Caravaca como se describió en el párrafo precedente.

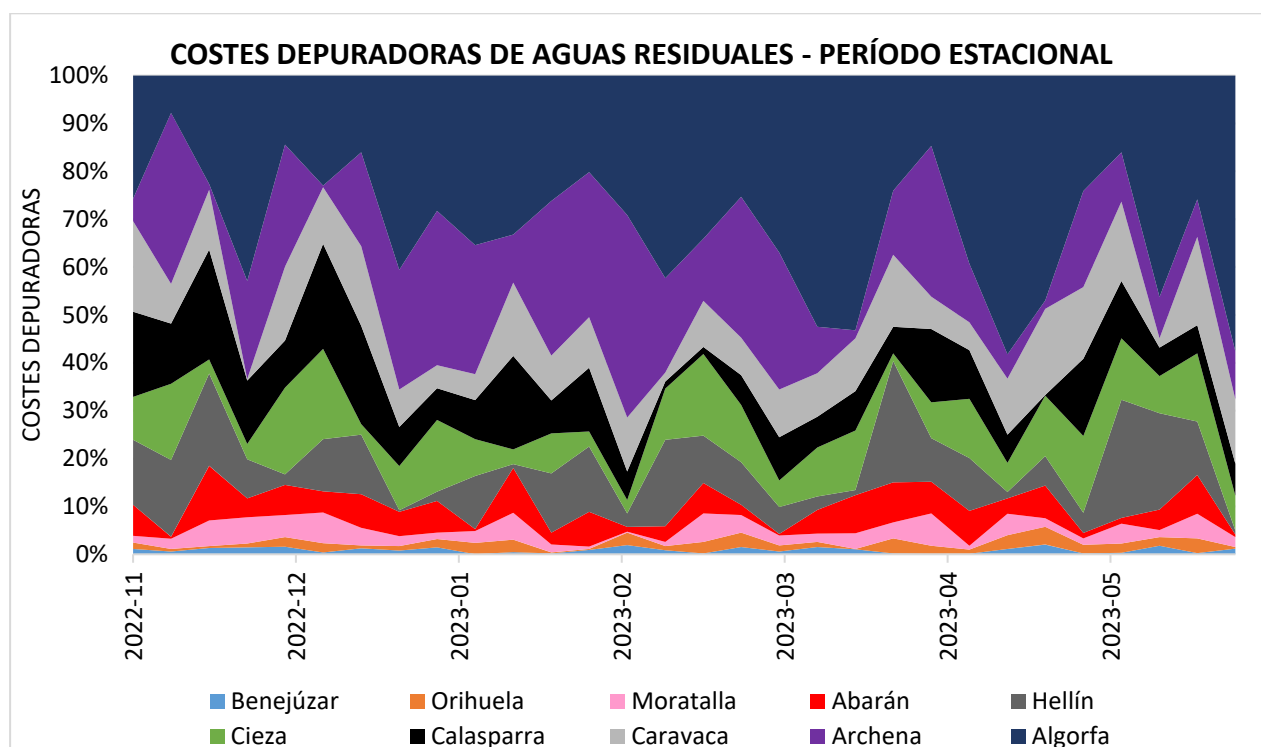


Gráfico 18. Valores porcentuales de costes depuradoras. Entorno SIAGES - período estacional

Además, se ha analizado el comportamiento conjunto de todas las estaciones depuradoras según la trayectoria determinista y los estadísticos de las 50 trayectorias probabilísticas obtenidos dentro del entorno SIAGES, representado el coste de la suma de todas las depuradoras incluidas en el evaluador.

Como se aprecia en el *Gráfico 19*, todas las series siguen la misma tendencia, cuyos máximos y mínimos se dan en las mismas fechas. La trayectoria determinista es la que obtiene mayores costes de operación, asociados a mayores recursos depurados que se aportan al sistema.

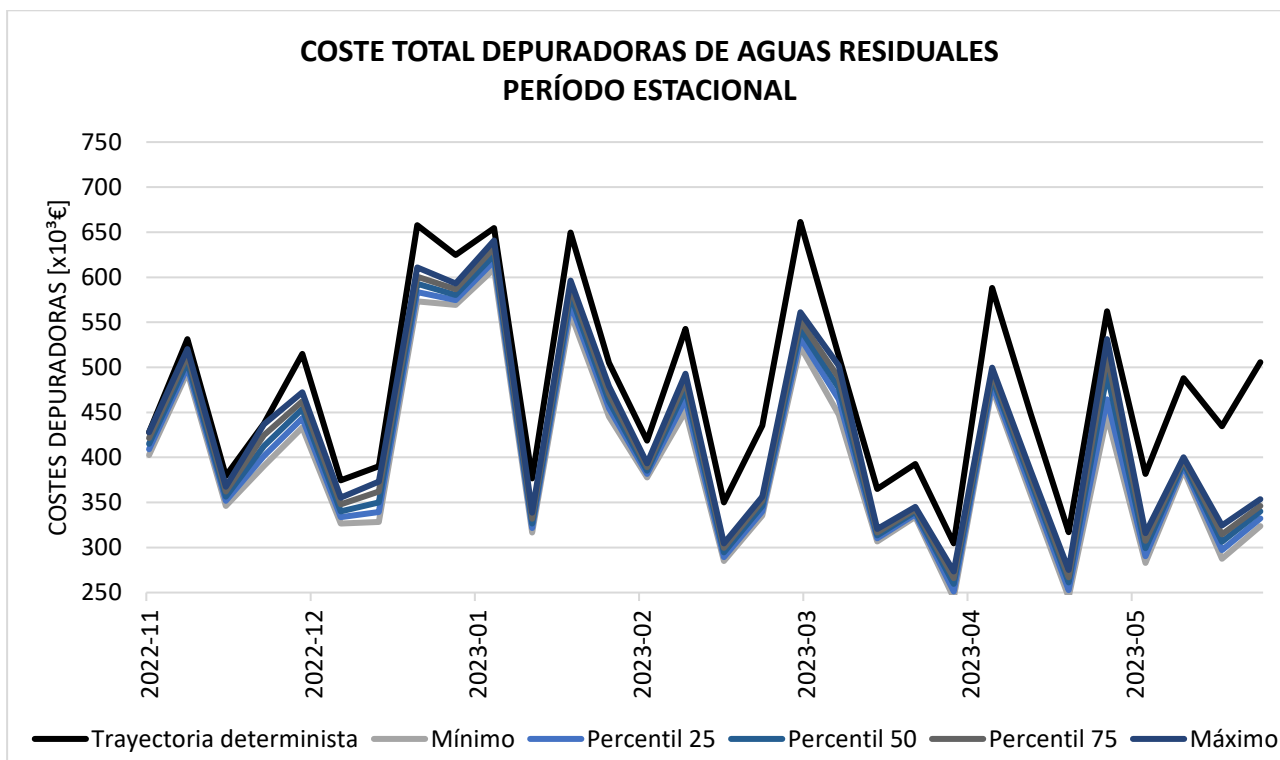


Gráfico 19. Costes operación estaciones depuradoras de aguas residuales Entorno SIAGES - período estacional

#### 9.2.4. BOMBEO SUBTERRÁNEOS PARA SUMINISTRO DE DEMANDAS AGRARIAS

Los costes de operación de bombes subterráneos para el suministro de demandas agrarias requieren de caudales bombeados, alturas de bombeo y características de cada uno de los pozos, como se ha descrito en los apartados precedentes.

Dentro del entorno de SIAGES, las alturas de bombes se obtienen de manera más directa que en la serie histórica, ya que en líneas de trabajo precedentes se estiman, por medio del modelo de hidrología subterránea, los niveles piezométricos para cada uno de los pozos de extracción.

Se ha optado por elaborar un mapa de calor para identificar los sectores de mayor o menos costes por extracción de agua subterránea. Se ha asignado colores más oscuros a aquellas masas de aguas de mayores costes por bombes en el período de noviembre 2022-mayo 2023 (Ver *Ilustración 13*).

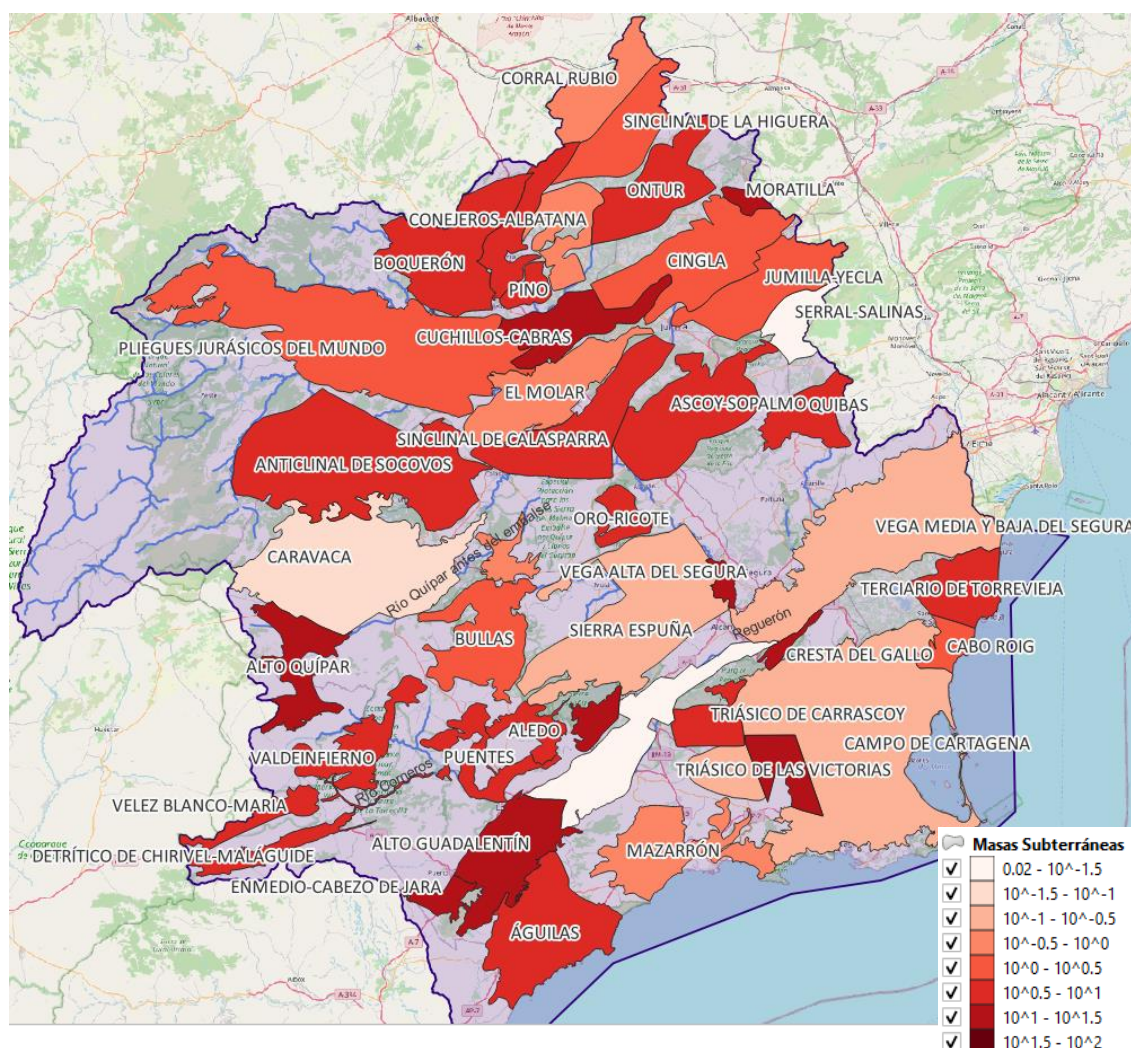


Ilustración 13. Costes de operación bombes de aguas subterráneas. Entorno SIAGES - período estacional (\*) Colores más oscuros representan mayores costes

En esta simulación, los mayores costes ocurren en las masas de agua de Alto Quípar y Moratilla, las cuales difieren de los resultados obtenidos en la simulación con datos históricos y según la tabla de “Recursos disponibles en las masas de agua subterránea de la Demarcación Hidrográfica del Segura” (Anejo 2 del PHDS 2022/27), ninguna de las masas tiene un elevado índice de sobreexplotación: Alto Quípar el IE es 0,69 y Moratilla 1,39.

Es necesario recordar que en el entorno SIAGES se emplean datos de predicciones y por ser un corto período de evaluación los resultados están influenciados por las condiciones iniciales impuestas, pudiendo obtener resultados un tanto sesgados.

### 9.2.5. CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

La herramienta desarrollada permite la estimación de volumen turbinado, energía generada y beneficios obtenidos por las centrales hidroeléctricas instaladas y contempladas en el modelo de hidrología superficial del Proyecto SIAGES.

Las características de las centrales se han expuesto en el capítulo 7.5 “CENTRALES HIDROELÉCTRICAS”. A continuación, se presentan los resultados de la evaluación realizada a partir de predicciones de SIAGES.

Tabla 20. Beneficios semanales centrales hidroeléctricas. Entorno SIAGES - período estacional

C. HIDROELECTRICAS	Beneficio [ $\times 10^3 \text{€}/\text{semana}$ ]
Fontanar III	55,58
Fontanar II	39,76
Almadenes	26,23
Fuentsanta	22,96
Fontanar I	19,18
Talave	16,71

Las centrales hidroeléctricas Fontanar II y III son las que mayores beneficios económicos generan el período de tiempo analizado. Ambas forman parte de la infraestructura hidráulica del ATS, por lo cual el caudal a turbinar está regulado en todo momento. La central Fontanar II es la de mayor potencia instalada y de mayor eficiencia, por ende, para el mismo caudal turbinado el beneficio es mayor.

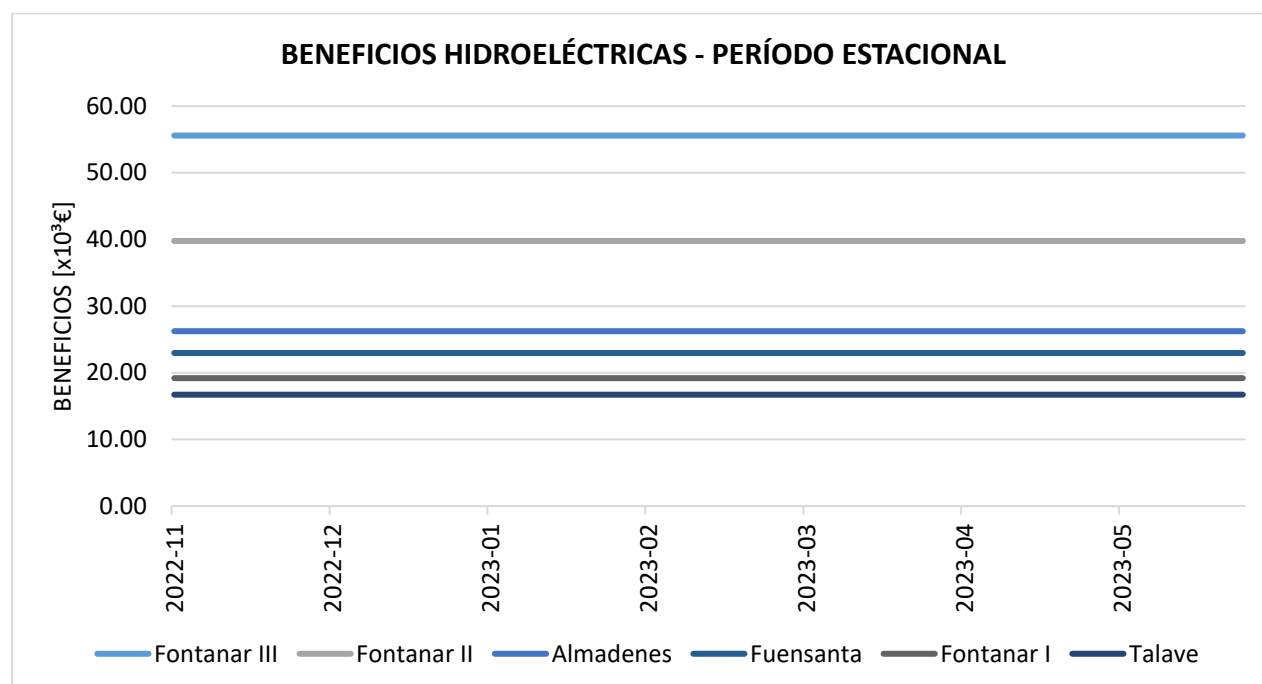


Gráfico 20. Beneficios semanales de centrales hidroeléctricas. Entorno SIAGES - período estacional

En el Gráfico 20, se presentan resultados de beneficios económicos en miles de euros semanales asociados a la energía generada en las centrales hidroeléctricas en el período noviembre 2022- mayo 2023. Del gráfico se desprende que los volúmenes turbinados por las centrales han sido valores

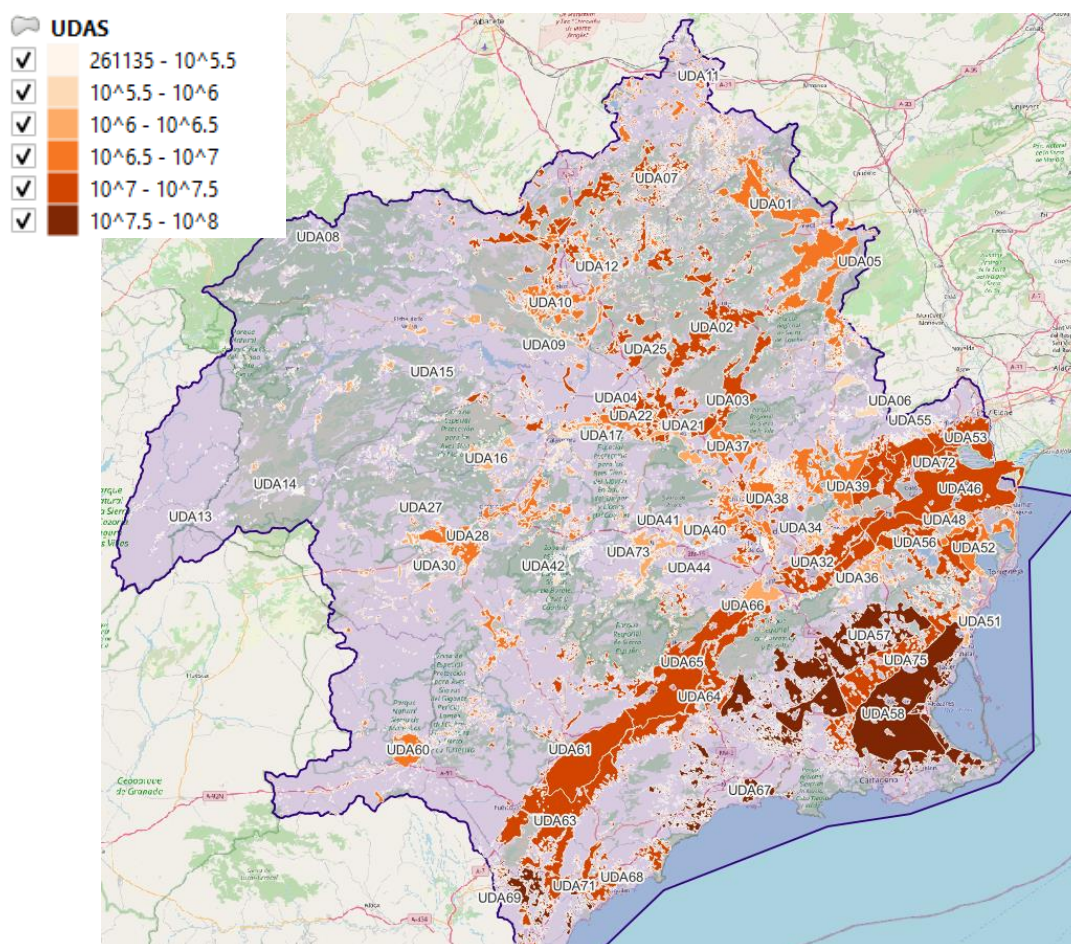


constantes para el período analizado e iguales al máximo que son capaces de turbinar las 6 centrales introducidas en el evaluador.

### 9.2.6. BENEFICIOS UNIDADES DE DEMANDA AGRARIA

En el apartado 4.6 “UNIDADES DE DEMANDA AGRARIA” se ha descrito la metodología de cálculo para la estimación de beneficio en las unidades de demanda agraria, el cual se realiza a partir del factor de reducción de producción estimado por líneas de trabajo precedentes en el entorno SIAGES M3-AGRO.

El resultado del evaluador es el **beneficio neto total** de cada UDA para el período estacional de noviembre 2022 a mayo 2023, por lo cual se representará por medio de un mapa de calor, en donde se pueda apreciar espacialmente los sectores en donde los beneficios fueron mayores (Ver *Ilustración 14*).



*Ilustración 14. Beneficios de Unidades de Demanda Agraria. Entorno SIAGES - período estacional*  
 (\*) Colores más oscuros representan mayores beneficios económicos

En el esquema, se observan importantes beneficios en las UDAs que se encuentran en el sureste de la demarcación, próximas a la costa del Mar Menor, las cuales corresponden al sector de Campo

de Cartagena, región reconocida por ser la más productiva de España. De lo contrario, en la región noroeste de la demarcación se tienen las UDAs con menores beneficios y bajo margen neto

En la *Tabla 21*, se presentan las diez unidades de demanda agraria con mayores beneficios en el período estacional dentro del entorno SIAGES, indicando el beneficio neto en miles de euros para los 7 meses analizados y el origen de recursos obtenidos de *la Tabla 15 del Anejo 3 “Usos y Demandas de Agua”* del PHDS (2015/22).

Tabla 21. UDAs con mayores beneficios. Entorno SIAGES - período estacional  
Origen de recursos según PHDS (2015/22)

UDA	Beneficio Neto [x10 <sup>3</sup> €]	Origen principal del recurso	Otros orígenes secundarios
UDA69 “Almería-Segura”	51464,2	Trasvase Negratín	Rec. desalinizados Aguas Subterráneas Aguas Superficiales
UDA67 “Mazarrón”	48118,7	Aguas Subterráneas	Rec. desalinizados Reutilización directa de aguas depuradas Aguas Superficiales
UDA57 “Campo de Cartagena”	45814,4	Aguas Subterráneas	Reutilización directa de aguas depuradas Rec. desalinizados
UDA58 “Regadíos redotados del TTS de la ZRT Campo Cartagena”	43344,0	ATS	Aguas Subterráneas Reutilización directa de aguas depuradas
UDA63 “Regadíos mixtos, Alto Guadalentín”	30609,1	Aguas Subterráneas	Rec. Desalinizados Aguas Superficiales Reutilización directa de aguas depuradas
UDA68 “Águilas”	29814,8	Rec. desalinizados	Aguas Subterráneas Reutilización directa de aguas depuradas
UDA22 “Vega Alta”	27654,9	Aguas Superficiales	Reutilización directa de aguas depuradas
UDA46 “Tradicional Vega Baja”	26433,1	Aguas Superficiales	Reutilización indirecta de aguas depuradas Reutilización directa de aguas depuradas Azarbes
UDA56 “Regadíos redotados del TTS de la ZRT La Pedrera”	24471,4	Aguas Subterráneas	Reutilización directa de aguas depuradas ATS Aguas Superficiales Rec. desalinizados Azarbes
UDA03 “Regadíos sobre Ascoy-Sopalmo”	22844,1	Aguas Subterráneas	Reutilización directa de aguas depuradas

De la tabla se desprende que el origen de los recursos en las unidades de demanda agraria de mayores beneficios netos es muy variado, por lo cual no se logra identificar que existe alguna relación directa entre estas dos variables consideradas.

### 9.2.7. COSTES ACUMULADOS EN PERÍODO ESTACIONAL

Con el objetivo de analizar que elemento del sistema de recursos hídricos tiene mayor peso en el coste de operación del sistema, se plantea una gráfica de costes acumulados de impulsiones en el

sistema superficial, desaladoras de agua de mar, estaciones depuradoras de aguas residuales y bombes de aguas subterráneas. En la misma gráfica, se incluye el volumen de agua suministrada en el sistema para satisfacer las demandas en el período de análisis.

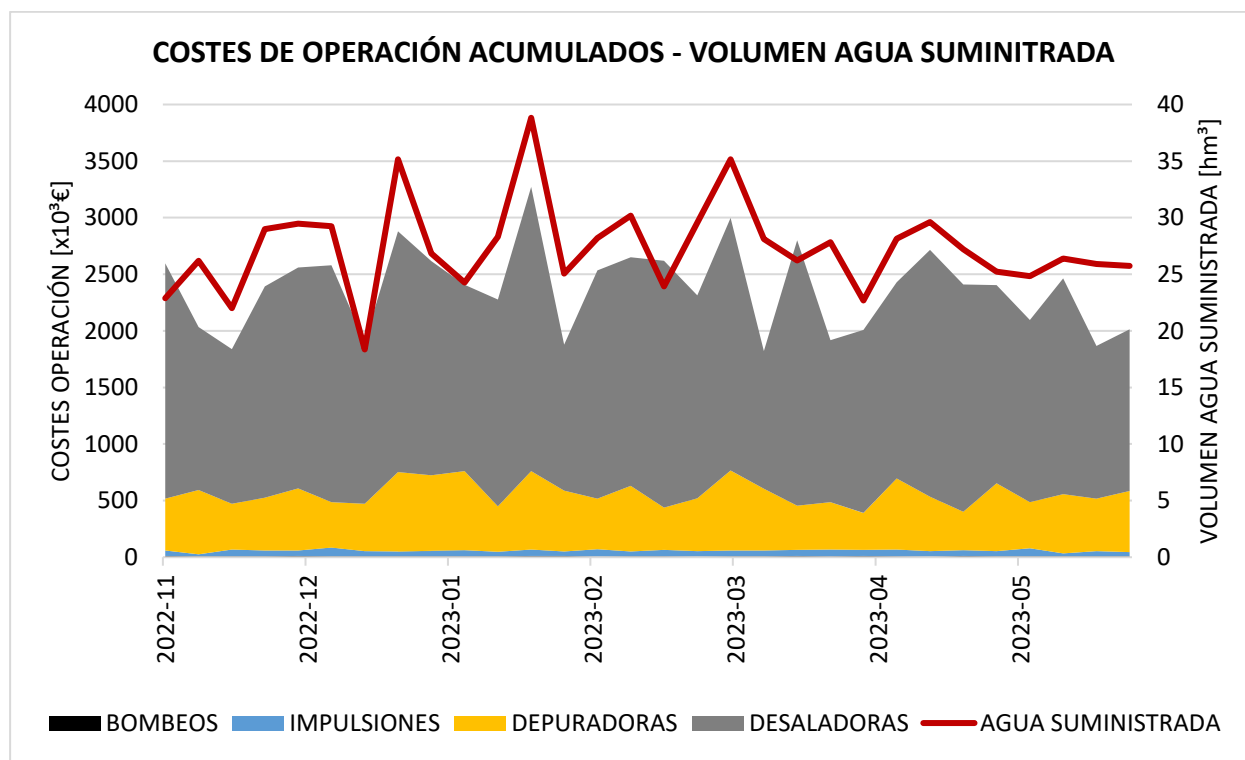


Gráfico 21. Costes de operación acumulados y volumen de agua suministrada. Entorno SIAGES - período estacional

En el Gráfico 21 se puede observar la notable influencia del coste de operación de desaladoras respecto al resto de los elementos del SRH en evaluación, con un valor promedio del 75% del total. Le siguen los costes de depuradoras de aguas residuales, con un promedio del 21%.

Los costes de bombes de aguas subterráneas e impulsiones en el sistema superficial son prácticamente despreciables frente a los otros elementos del sistema y no se alcanzan a apreciar en la gráfica. Esto último, motiva a que los productores agrarios al empleo de agua subterránea y trasvasada, oponiéndose al mayor uso de agua desalada para riego, su elevado coste.

En el gráfico, además, se aprecia que los picos en el volumen de agua consumida se corresponden con picos en costes de operación de desaladoras, lo cual está asociado a que, en caso de necesidad de mayores recursos disponibles en la cuenca, la desalación es la solución.

### 9.3. RESULTADOS SIMULACIÓN ENTORNO SIAGES A CORTO PLAZO

Como se ha mencionado en más de una oportunidad, el proyecto SIAGES, es una herramienta de apoyo a la toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico en tiempo real, en este apartado se

exponen los resultados para el período a **corto plazo** partiendo de predicciones meteorológicas para 15 días.

Como se ha descrito en el capítulo 8 “RESUMEN ESCENARIOS SIMULADOS”, SIAGES contempla diferentes opciones de procesamiento: simulación de gestión, optimización de gestión y optimización hidroeconómica. En este capítulo, se hará hincapié en la comparación de resultados de simulación y optimizaciones, omitiendo los resultados individuales de cada elemento por ser similares a los presentados en el período estacional y no redundar en metodología de análisis.

Se realizarán comparaciones entre costes de operación de impulsiones en el sistema superficial, de desaladoras de agua de mar, de depuradoras de aguas residuales y bombes de aguas subterráneas para suministro de demandas agrarias, y beneficios de centrales hidroeléctricas, para datos obtenidos dentro del entorno SIAGES para el período 08/03/2023 a 22/03/2023. Con respecto a beneficios de UDAS, no se estiman a corto plazo ya que carece de sentido, como ya se ha justificado en el apartado 7.6 “UNIDADES DE DEMANDA AGRARIA”.

### 9.3.1. IMPULSIONES EN SISTEMA SUPERFICIAL

A partir de datos de caudales impulsados en el sistema superficial se han estimado los costes totales de operación para las tres opciones de procesamiento que brinda el proyecto SIAGES.

En el *Gráfico 22*, se representan los costes totales de operación de impulsiones. El mayor coste se tiene para la simulación de optimización de gestión, lo que significa que al optimizar la gestión de recursos se incrementan los costes de operación de impulsiones.

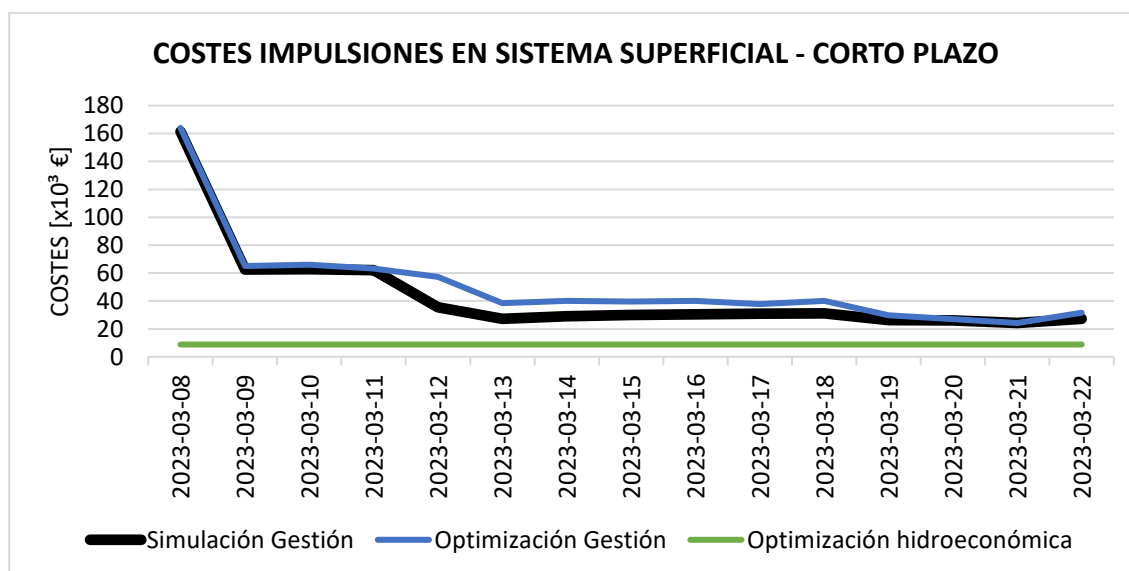


Gráfico 22. Costes diarios de impulsiones. Entorno SIAGES – Escenario: corto plazo

Al realizar la optimización hidroeconómica, los costes disminuyen notablemente, esto se debe a que se priorizan otro tipo de suministro a la hora de satisfacer las demandas que son menos costosos.

Otra cuestión por destacar de la gráfica de costes diarios de impulsiones en el entorno SIAGES es que para la optimización hidroeconómica, el coste de operación de impulsiones se mantiene constante para los 15 días evaluados. En cambio, en las simulaciones de gestión y optimización de gestión, la tendencia es decreciente, dejando en evidencia la influencia de la situación inicial del sistema al realizar la predicción.

### 9.3.2. INSTALACIONES DESALADORAS DE AGUA DE MAR

Aplicando la misma metodología que en el apartado anterior, se analizan los costes totales de desaladoras de agua de mar en el período a corto plazo, obteniendo los resultados que se exponen a continuación.

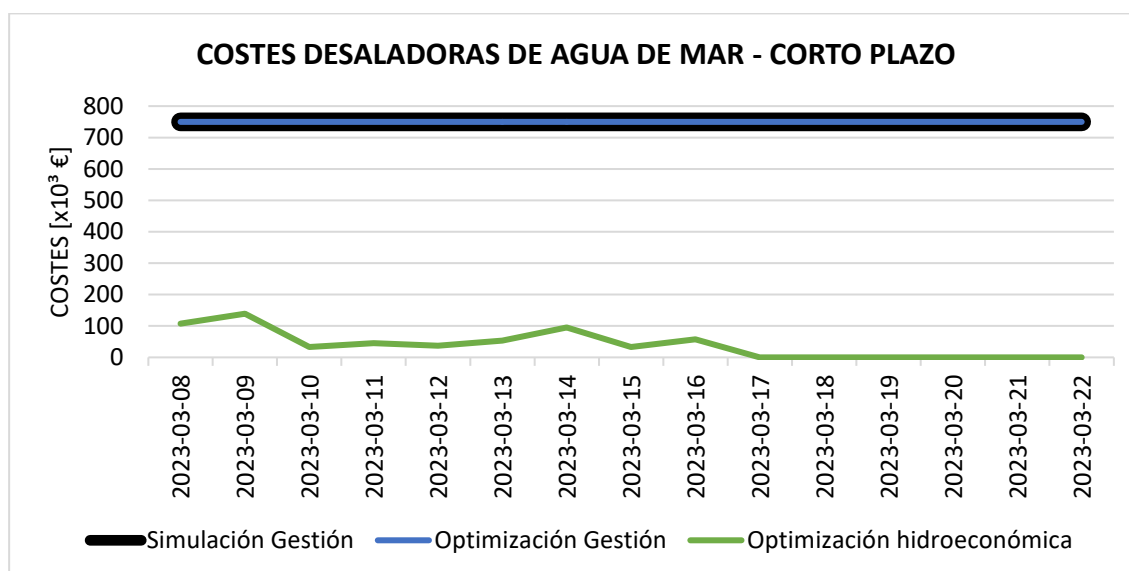


Gráfico 23. Costes diarios de desaladoras. Entorno SIAGES – Escenario: corto plazo

Los costes de operación de desaladoras para los procesos de simulación y optimización de gestión coinciden, lo cual representa que los caudales tratados en ambos procedimientos son los mismos.

Al realizar la optimización hidroeconómica, el coste de operación de desaladoras disminuye considerablemente, lo cual viene asociado a una reducción de caudales aportados al sistema por este medio, debido al alto coste de producción.

Como se analizó en los resultados de datos históricos y datos en el entorno SIAGES en período estacional, el coste de desalación es el más representativo de todos los elementos incluidos en la evaluación, por ende, tiene lógica que se haya disminuido esta fuente no convencional de recursos con el fin de optimizar hidroeconómicamente el funcionamiento del sistema.

### 9.3.3. BOMBEO SUBTERRÁNEOS PARA SUMINISTRO DE DEMANDAS AGRARIAS

En cuanto a los costes de bombeos subterráneos para el suministro de demandas agrarias es donde más diferencia se aprecia entre los tres procesamientos de datos realizados (Ver Gráfico 24).

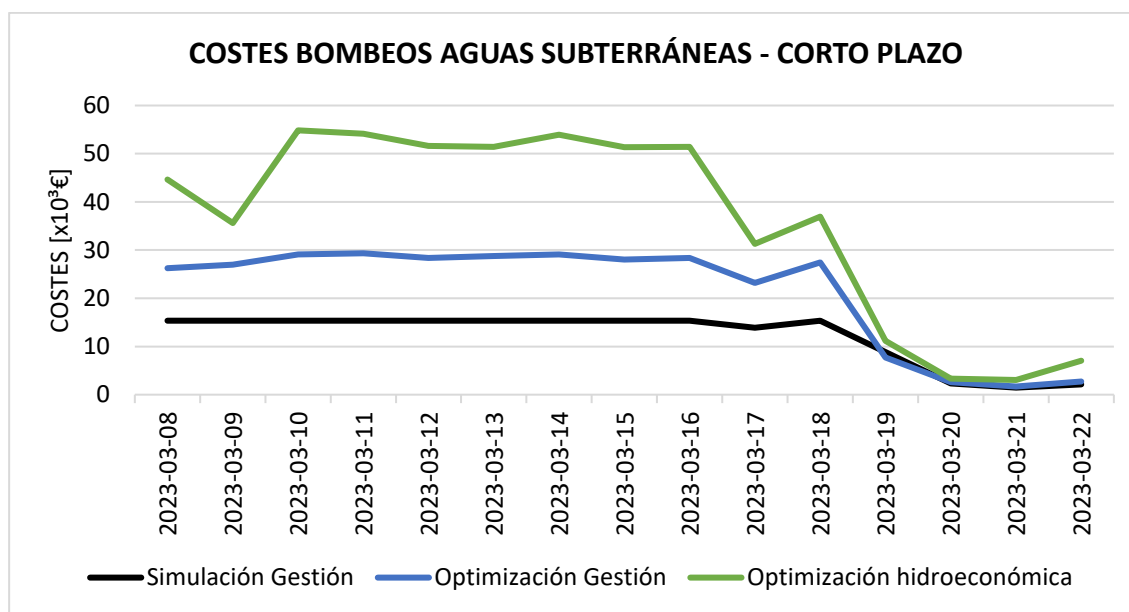


Gráfico 24. Costes diarios de bombeos. Entorno SIAGES – Escenario: corto plazo

La simulación de gestión resulta ser la de menor coste de operación a causa de bombeos de aguas subterráneas y la optimización hidroeconómica, la mayor.

En los capítulos anteriores, se demostró que los **costes de bombeos** son los de menor influencia en el coste de operación total en la DHS, es por ello por lo que, a la hora de optimizar costes, resulta el mayor requerimiento de agua subterránea.

Esta conclusión, permite comprender el porqué de la sobreexplotación de acuíferos en la región a lo largo de los años, además de la facilidad de los agricultores por hacer uso de aguas subterráneas.

### 9.3.4. CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Se han evaluado, también, los beneficios obtenidos por la generación de energía de las centrales hidroeléctricas instaladas en la DHS. En el siguiente gráfico se presentan los beneficios para las 3 simulaciones realizadas.

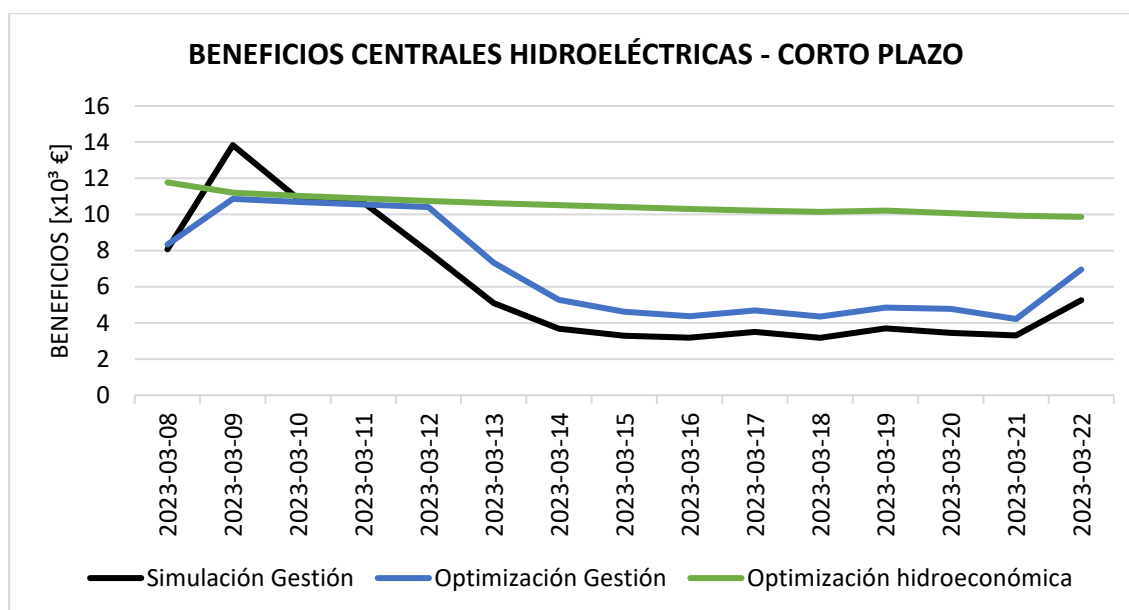


Gráfico 25. Beneficios diarios de centrales hidroeléctricas. Entorno SIAGES – Escenario: corto plazo

En la gráfica, se aprecia que el procesamiento de optimización hidroeconómica es la que mayor beneficios genera, lo cual es esperable al tratarse de beneficios económicos en el sistema. En cambio, la simulación de gestión es la que aporta menores beneficios.

Nuevamente, se debe resaltar la influencia de las condiciones iniciales, principalmente en las simulaciones de gestión en donde las gráficas presentan tendencia decreciente.

### 9.3.5. COSTES Y BENEFICIOS TOTALES A CORTO PLAZO

Finalmente, en el *Gráfico 26*, se analizan los costes de operación y beneficios de centrales hidroeléctricas de manera conjunta, con el fin de comparar los resultados de simulación y las dos posibles optimizaciones.

Los costes se han graficado con respecto al eje de margen izquierdo y los beneficios respecto al margen derecho. Los resultados obtenidos indican que el procesamiento de optimización hidroeconómica aporta menores costes y mayores beneficios en la gestión del recurso para la DHS en período a corto plazo analizado a partir de predicciones meteorológicas.

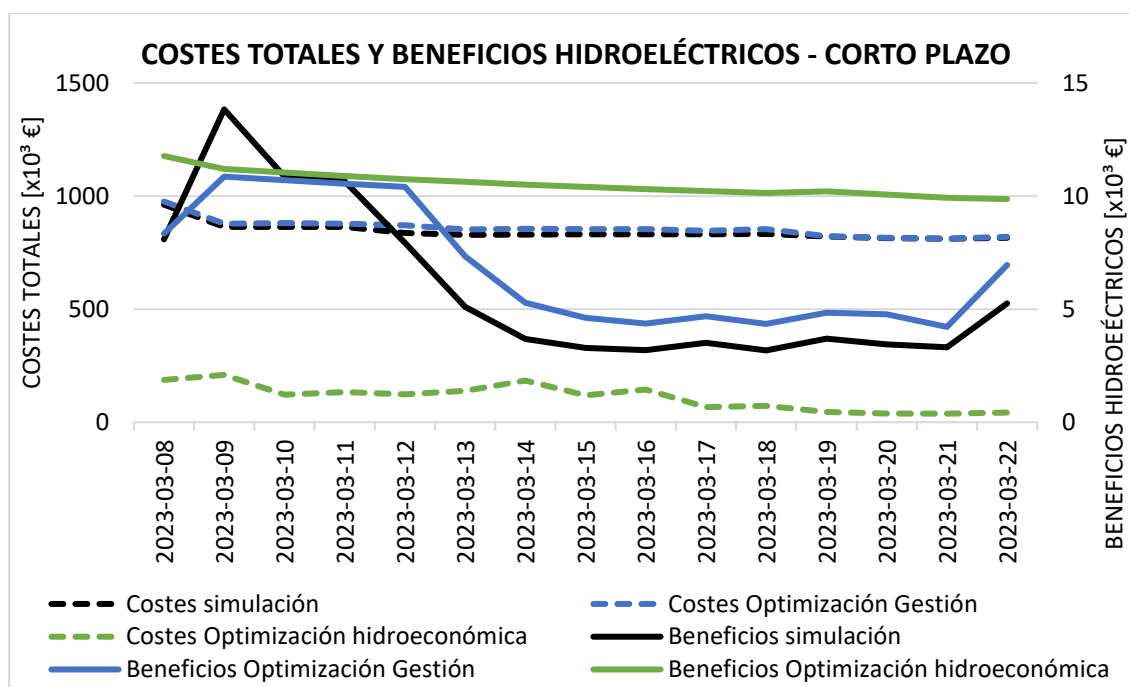


Gráfico 26. Costes totales y beneficios hidroeléctricos. Entorno SIAGES – Escenario: corto plazo

En el gráfico, no se aprecian diferencias considerables entre los costes de operación totales entre la simulación y optimización de gestión, en ambos casos los costes de desaladoras y depuradoras son los mismos. Las diferencias se deben a costes de impulsiones y bombeos de aguas subterráneas, pero su peso en el coste total no es tan significativo.

En cambio, es notable la diferencia con el coste de operación para la simulación de optimización hidroeconómica en donde se ha conseguido disminuir en buena medida los costes totales del sistema.

Por su parte, los beneficios corresponden a los de las centrales hidroeléctricas, resultando más ventajoso el proceso de optimización hidroeconómica, como se ha mencionado en el apartado anterior.

#### 9.4. VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA

Es de suma importancia, evaluar la bondad de la herramienta desarrollada comprobando si los resultados obtenidos se asemejan a los costes y beneficios ocurridos en la Demarcación Hidrográfica del Segura. Para ello se ha consultado en diversas fuentes bibliográficas, entre las que se pueden citar memorias anuales de los organismos gestores, plan hidrográfico de la demarcación y publicaciones científicas.



### 9.4.1. IMPULSIONES EN EL SISTEMA SUPERFICIAL

En la publicación de Melgarejo Moreno et al. (2010) se encuentran publicados los consumos energéticos de las impulsiones para el año 2004, y se han comparado con los resultados obtenidos para la serie Histórica presentados en el apartado 9.1.1 “IMPULSIONES EN SISTEMA SUPERFICIAL”.

Tabla 22. Validación de herramienta Impulsiones en el sistema superficial año 2004

IMPULSIÓN	CONSUMO ENERGÉTICO [GWh]	
	Incidencia del Traspase Tajo-Segura en la provincia de Alicante	Resultado evaluador
Ojós	69,61	56,06
Alhama	37,82	34,71
Zona II	6,37	6,16
Yéchar	4,61	2,40
Crevillente	0,85	7,28
Fuente Álamo	8,68	5,21

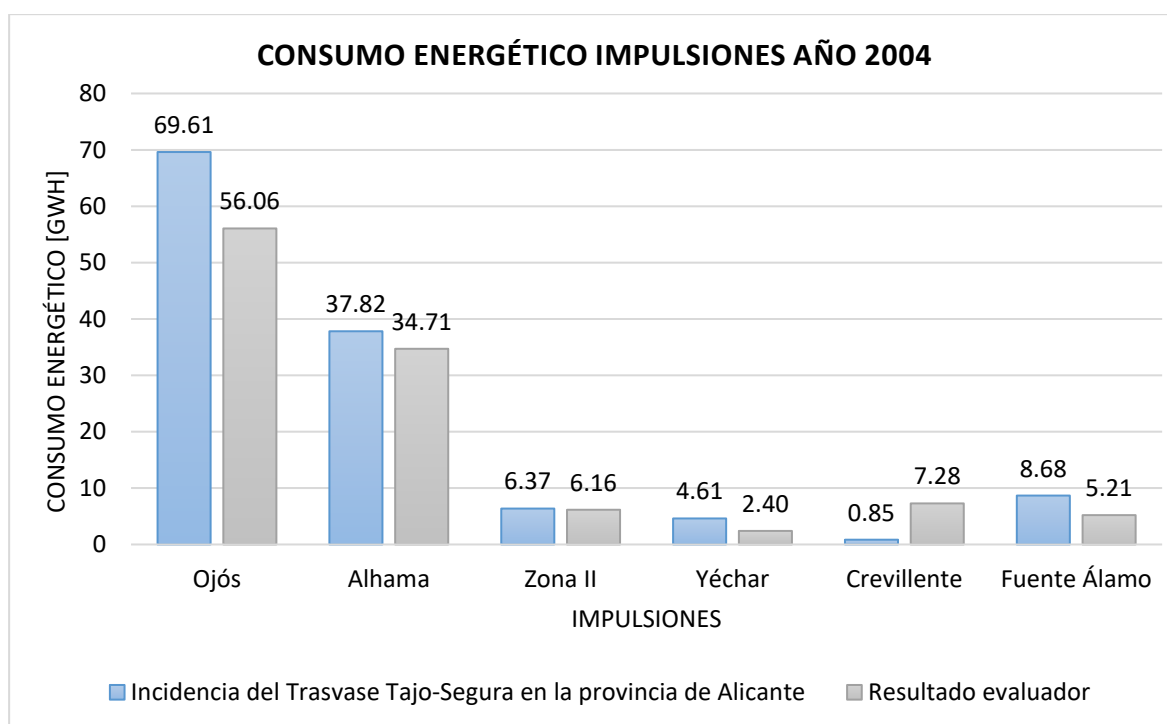


Gráfico 27. Validación de herramienta Impulsiones en el sistema superficial. Consumo energético año 2004

Al comparar ambas gráficas, la tendencia es similar. Se aprecian leves diferencias en la impulsión de Ojós y Crevillente, lo cual se puede asociar a distintos caudales impulsados entre lo modelado con la herramienta a partir de información histórica del modelo de Aquatool-SIMGES y los valores registrados por la Demarcación Hidrográfica del Segura en el año 2004.

#### 9.4.2. INSTALACIONES DESALADORAS DE AGUA DE MAR

Los costes de desalación en España oscilan entre 0,6 y 1,0 €/m<sup>3</sup> según los datos publicados en el informe de Martínez Cebrián (2019). Se recurre a los resultados de la simulación histórica del apartado 9.1 “RESULTADOS SIMULACIÓN SERIES HISTÓRICAS 1980-2011” para contrastar el coste unitario promedio de cada una de las desaladoras de agua de mar incluidas en el modelo del evaluador.

Tabla 23. Coste unitario promedio de desaladoras de agua de mar en período histórico

Desaladora	Coste Unitario promedio [€/m <sup>3</sup> ]
<b>Alicante I</b>	<b>1,17</b>
Alicante II	0,58
San Pedro de Pinatar I	0,97
San Pedro de Pinatar II	0,86
Valdelentisco	1,04
Águilas	1,01
<b>Torre vieja</b>	<b>1,10</b>
C.R. Campo Cartagena (El Mojón)	0,99
C.R. Virgen de Los Milagros (Mazarrón)	1,01
Águilas Regadíos	0,99
Escombreras	0,86

El coste unitario de la mayoría de las desaladoras se encuentra dentro del rango de referencia. Las desaladoras Alicante I y Torre vieja se encuentran por encima del valor de referencia en menos del 20%.

En el *Capítulo 10.4* se realizará la validación de herramienta ambiental considerando información de desaladoras de agua de mar gestionadas por la Mancomunidad de Canales del Taibilla en donde también se proporcionará información respecto a costes de operación, que complementan este apartado.

#### 9.4.3. BOMBEO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Para la validación de costes de operación de bombes de aguas subterráneas se ha tomado como referencia la publicación de C. Rupérez Moreno et al. (2017) en donde se propone un modelo para estimación de costes de bombes en los acuíferos sobreexplotados de la Demarcación Hidrográfica del Segura, diferenciando costes de extracción y de distribución dentro de cada Unidad de Demanda Agraria, considerando de referencia el año 2015. Por parte de los resultados obtenidos, se cuentan con los datos de costes de bombes para el período histórico expuestos en el Apartado 0 “

##### *BOMBEO SUBTERRÁNEO PARA SUMINISTRO DE DEMANDAS AGRARIAS”.*

Se ha propuesto realizar la comparación con los promedios anuales para cada uno de los acuíferos para los últimos 10 años de la serie, ya que es la información disponible más cercana en el tiempo al año 2015 de referencia. Los resultados se representan en el *Gráfico 28*.

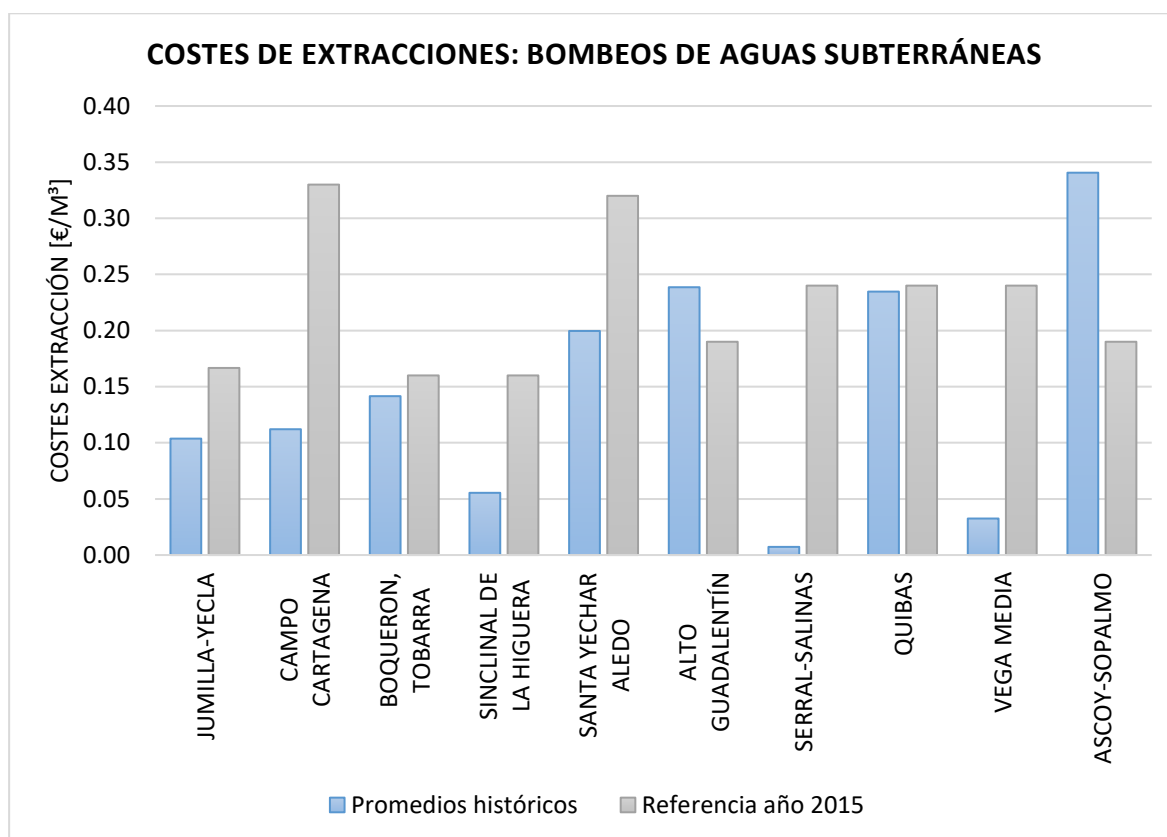


Gráfico 28. Validación de herramienta: estimación de costes de bombes de aguas subterráneas.

Los resultados para los acuíferos analizados son muy dispares. **“Boquerón, Tobarra y otros”** y **“Quibas”** presentan costes de operación muy similares, pero en cambio, en el acuífero **“Serral Salinas”** o **“Vega Media”** la diferencia es muy notable.

La principal diferencia observada en cuanto a la metodología empleada para la estimación de costes de bombes es que en el evaluador desarrollado en el presente trabajo académico se emplean alturas de bombeo dinámicas, obtenidas a partir de las relaciones cota-volumen y en la publicación de referencia se toman alturas estáticas.

Adicionalmente, Custodio et al. (2016), citan que el **coste promedio de riego por bombes subterráneos es 0,50€/m³**. En los resultados del Gráfico 28, todos los valores son inferiores a 0,35€/m³ lo cual supone una infravaloración en las simulaciones realizadas para la serie histórica.

#### 9.4.4. CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

En el Anexo II del Anejo 03 de la Propuesta de Proyecto del Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura 2022/27 **“Parque Hidroeléctrico”**, se encuentra publicada la producción de energía de cada una de las centrales durante el año 2006.

El evaluador desarrollado, entre otros, aporta como resultado la energía producida. Por lo cual se han contrastado los resultados correspondientes al año 2006 de la simulación en período histórico con los publicados en el PHDS.

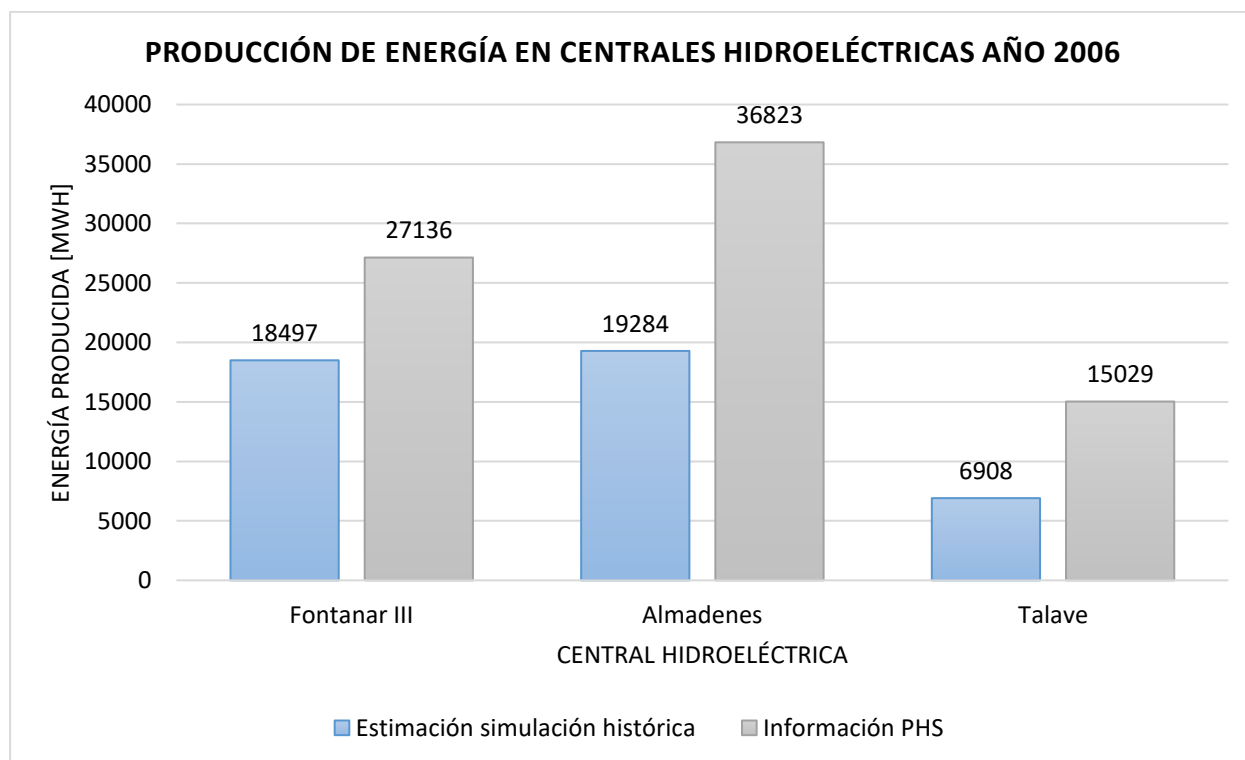


Gráfico 29. Validación de herramienta: estimación de energía producida en el año 2006.

Al comparar los valores simulados de la información histórica con los publicados en el Plan Hidrológico la diferencia es considerable, en los tres elementos considerados se está subestimando la producción, un 68% para Fontanar III, un 52,4% para Almadenes y 46% para Talave.

Esta discrepancia en la estimación se puede deber a diferencias entre los volúmenes turbinados o algún error a la hora de caracterizar la eficiencia de las centrales descritas en la *Tabla 7*.

## 10. RESULTADOS DEL EVALUADOR AMBIENTAL

---

Con el fin de presentar una metodología de análisis de resultados del evaluador ambiental, se detallarán a continuación resultados para los tres escenarios planteados en el Capítulo 8, de manera análoga a lo realizado con el evaluador hidroeconómico.

Como novedad, en la simulación correspondiente al período histórico y el estacional, se verificará el cumplimiento de caudales ecológicos en las masas de aguas superficiales de la Demarcación Hidrográfica del Segura.

### 10.1. RESULTADOS SIMULACIÓN SERIES HISTÓRICAS 1980-2011

Se ha realizado la simulación para estimar emisiones de CO<sub>2</sub> y sus respectivos costes, y la verificación de cumplimiento de caudal ecológico para la misma serie de datos de 1980-2011 obtenida del modelo Aquatool-SIMGES asociado al PHDS 2015/22.

Se presentan sólo de manera independiente los resultados de impulsiones en el sistema superficial y desaladoras de agua de mar. En cuanto a los bombeos de aguas subterráneas para abastecimiento de demandas agrarias, el mapa de color resultante es igual al ya expuesto en la *Ilustración 12. Costes de operación en bombeos de aguas subterráneas para riegos. Serie histórica* y se ha priorizado en no redundar con la información presentada.

Luego, se presentan resultados combinados de los elementos del SRH incluidos en el evaluador y la relación que existe entre las aportaciones al sistema con las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Finalmente se presentan resultados de incumplimientos de caudales ecológicos en el período histórico evaluado.

#### 10.1.1. IMPULSIONES EN SISTEMA SUPERFICIAL

Las emisiones de CO<sub>2</sub> debido a impulsiones en el sistema superficial son directamente proporcionales al consumo energético requerido para elevar los recursos. Como se ha desarrollado en capítulos anteriores, cada impulsión tiene asociado un requerimiento energético que depende del desnivel a superar y del equipamiento instalado, ver en *Tabla 4. Caracterización de costes y emisiones de impulsiones en el sistema Tajo-Segura*.

La información de caudales impulsados que se han introducido en el evaluador para el escenario de simulación histórica corresponde a los ya presentados en la *Tabla 10. Caudal de impulsiones en sistema superficial*

*Información extraída de Modelo Aquatool-SIMGES, PHDS 2015/21.* En este apartado se exponen directamente los resultados obtenidos por medio del evaluador ambiental.

Tabla 24. Promedios mensuales de caudal impulsado, emisiones de CO<sub>2</sub> y costes por emisiones de CO<sub>2</sub>. Serie histórica

	CAUDAL IMPULSADO [hm <sup>3</sup> /mes]	EMISION CO <sub>2</sub> [Ton CO <sub>2</sub> /mes]	COSTE EMISIÓN CO <sub>2</sub> [€/mes]
Yechar	0,36	4,48	0,24
Fuente Álamo	1,25	9,71	0,52
Blanca	9,21	113,17	6,06
Algeciras	4,29	46,32	2,48
Crevillente	8,02	16,86	0,90
Alhama	7,09	65,51	3,51
Ojós	8,55	98,48	5,27
Altomira	25,42	494,82	26,50

En el *Gráfico 30*, se han presentado valores promedios de caudales impulsados (hm<sup>3</sup>/mes), emisiones de dióxido de carbono (TonCO<sub>2</sub>/mes) y costes por emisión (x10<sup>3</sup>€/mes) para cada una de las impulsiones en el período histórico 1980-2011. La impulsión de **Altomira** es la que preside la tabla de emisiones generadas, lo cual está asociado a que es la que mayor caudal impulsa al encontrarse al inicio del sistema trasvase Tajo-Segura, además de ser la que mayor altura debe superar.

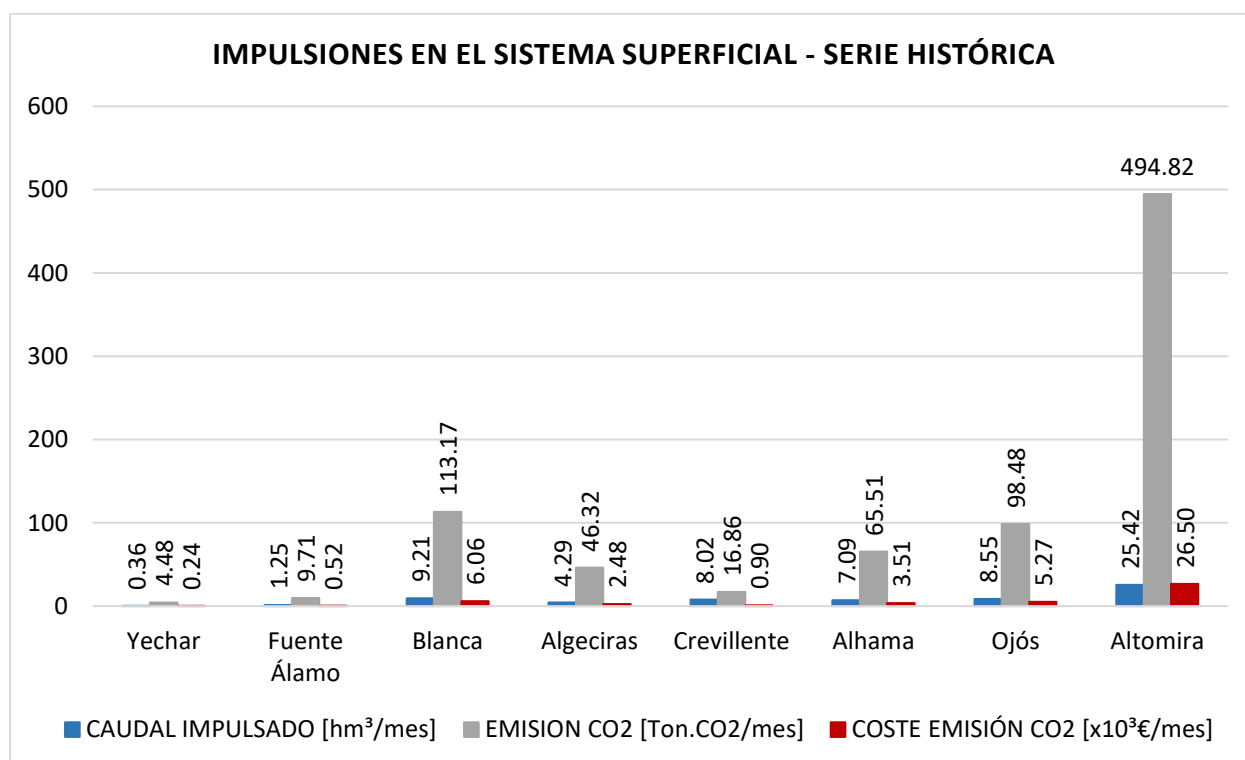


Gráfico 30. Promedios mensuales de caudal impulsado, emisiones de CO<sub>2</sub> y costes por emisiones de CO<sub>2</sub>. Serie histórica

El comportamiento de las series de datos de emisiones de CO<sub>2</sub> debidas a impulsiones en el sistema superficial para el período histórico es el mismo el de costes de operación para el mismo escenario, sobresale la impulsión de Altomira sobre el resto de las instalaciones, le siguen la Blanca y Ojos que pertenecen a la infraestructura del trasvase. En aquellas impulsiones pertenecientes al postravase

(CPMI y CPMD) las emisiones que generan son menores, como también lo es su caudal a impulsar y desniveles que deben sortear.

### 10.1.2. INSTALACIONES DESALADORAS DE AGUA DE MAR (IDAM)

Las emisiones de CO<sub>2</sub> por parte de las desaladoras adquiere un papel relevante en la demarcación, ya que son reconocidas por su elevado consumo energético (Ver *Tabla 5. Caracterización de costes y emisiones de instalaciones desaladoras de agua de mar*) y las emisiones vienen asociadas a tal consumo.

Las series de datos de caudales desalados introducidos al evaluador para el escenario histórico coinciden con lo ya expuesto en la *Tabla 12. Caudales mensuales producidos por las IDAMS*

*Información extraída de Modelo Aquatool-SIMGES, PHDS 2015/21*". Se presentan a continuación los resultados de la evaluación.

*Tabla 25. Promedios mensuales de caudal desalado, emisiones de CO<sub>2</sub> y costes por emisiones de CO<sub>2</sub>. Serie histórica*

	CAUDAL DESALADO [hm <sup>3</sup> /mes]	EMISION CO <sub>2</sub> [Ton CO <sub>2</sub> /mes]	COSTE EMISIÓN CO <sub>2</sub> [€/mes]
C.R. El Mojón	0,15	12,80	1,03
Alicante II	0,28	15,97	1,29
Escombreras	0,55	45,89	3,71
Águilas	0,55	52,50	4,25
C.R. Mazarrón	0,83	70,83	5,73
San Pedro de Pinatar II	1,03	86,05	6,96
San Pedro de Pinatar I	1,03	96,83	7,83
Torrevieja	1,82	193,83	15,67
Alicante I	1,90	215,50	17,43
Valdelentisco	2,57	218,19	17,64
C.R. Águilas	4,75	403,92	32,66

En la *Tabla 25* y el *Gráfico 31* se puede observar que las mayores emisiones se generan en las desaladoras de Torrevieja, Alicante I, Valdelentisco y Águilas, que representan el 70% de producción de agua desalada en la demarcación en el período 1980-2011.

Las mismas cuatro IDAMs han sido analizadas con mayor profundidad al presentar los resultados del evaluador hidroeconómico (Ver *subcapítulo 9.1.2 "DESALADORAS DE AGUA DE MAR"*).

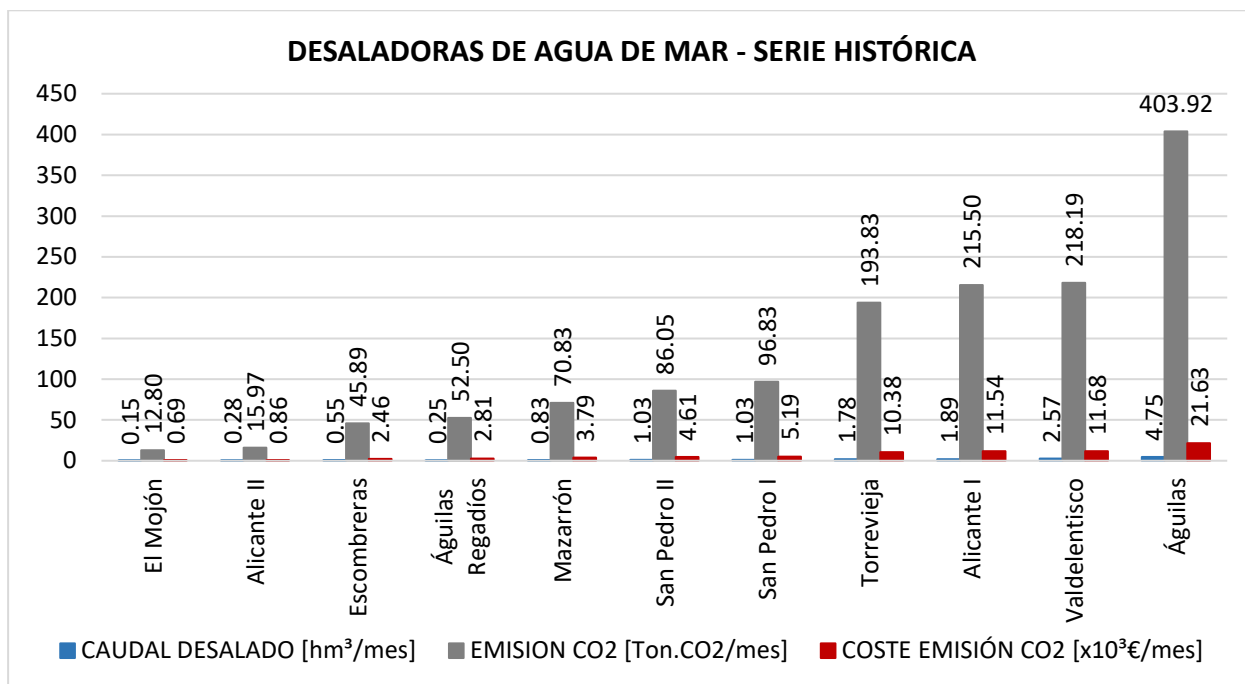


Gráfico 31. Promedios mensuales de caudal desalado, emisiones de CO<sub>2</sub> y costes por emisiones de CO<sub>2</sub>. Serie histórica

### 10.1.3. EMISIONES DE CO<sub>2</sub> IMPULSIONES, DESALADORAS Y BOMBEOS

La relación entre las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por la operación de desaladoras de agua de mar, impulsiones en el sistema superficial y bombeos de aguas subterráneas, se ha propuesto un diagrama de áreas apiladas (ver Gráfico 32), en donde se demuestra el porcentaje promedio de afectación representa cada uno de los elementos respecto a las emisiones totales en el período estacional.

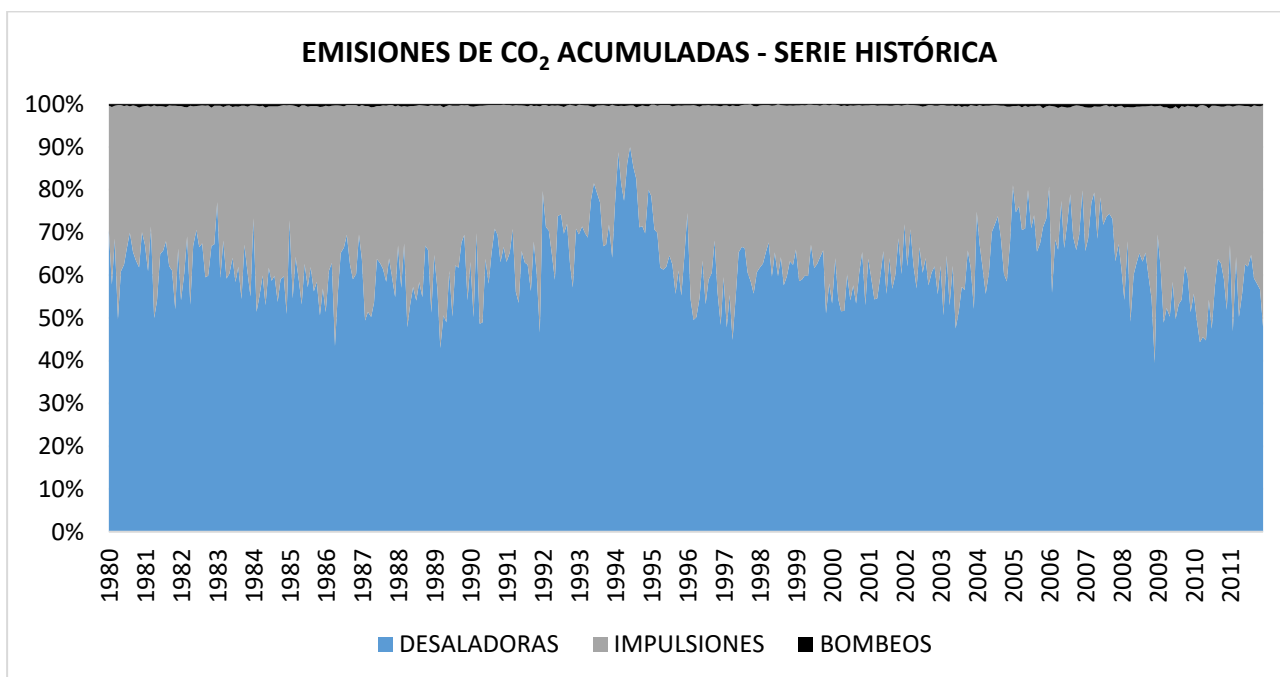


Gráfico 32. Valores porcentuales de emisiones de CO<sub>2</sub> debido a desaladoras, impulsiones y bombeos. Serie histórica



Se aprecia con notoriedad que las mayores emisiones de dióxido de carbono se deben a las **instalaciones desaladoras de agua de mar**, que representa en promedio el 65% de las emisiones en todo el período histórico analizado, llegando al máximo del 90% en marzo de 1995, en donde hubo un máximo en la producción de agua desalada a causa de no trasvases en el sistema asociados a sequía importante en la península.

En segundo orden de importancia se encuentran las impulsiones en el sistema superficial con promedio del 34,5% y finalmente los bombeos promedian solamente el 0,4% del total, valor prácticamente despreciable frente a los demás elementos.

#### 10.1.4. RELACIÓN ENTRE APORTACIONES AL SISTEMA Y VARIACIÓN EMISIONES DE CO<sub>2</sub>

El evaluador desarrollado, posibilita analizar la relación que existe entre aportaciones superficiales en el sistema y variación en emisiones de CO<sub>2</sub>.

Para representar la gráfica con más claridad se han acumulado valores por año hidrológico (octubre-septiembre). Se aprecia que las máximas aportaciones se corresponden con mínimas emisiones de CO<sub>2</sub>, como por ejemplo en los años 1990-91 o 2010-11.

Por lo contrario, las mínimas aportaciones coinciden temporalmente con máximas emisiones de CO<sub>2</sub> (años 2000-01 o 2012-13), lo cual tiene relación con un mayor requerimiento en el sistema de recursos no convencionales, provenientes de desalación o impulsiones que generan mayores consumos energéticos.

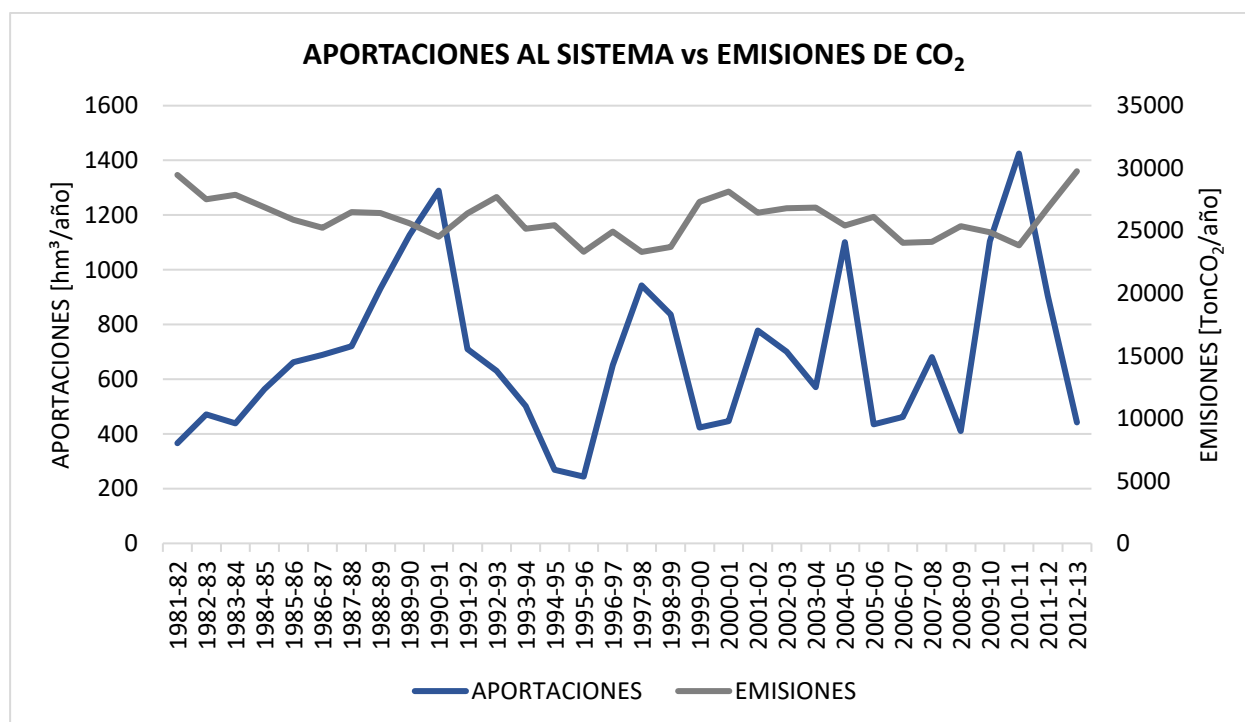


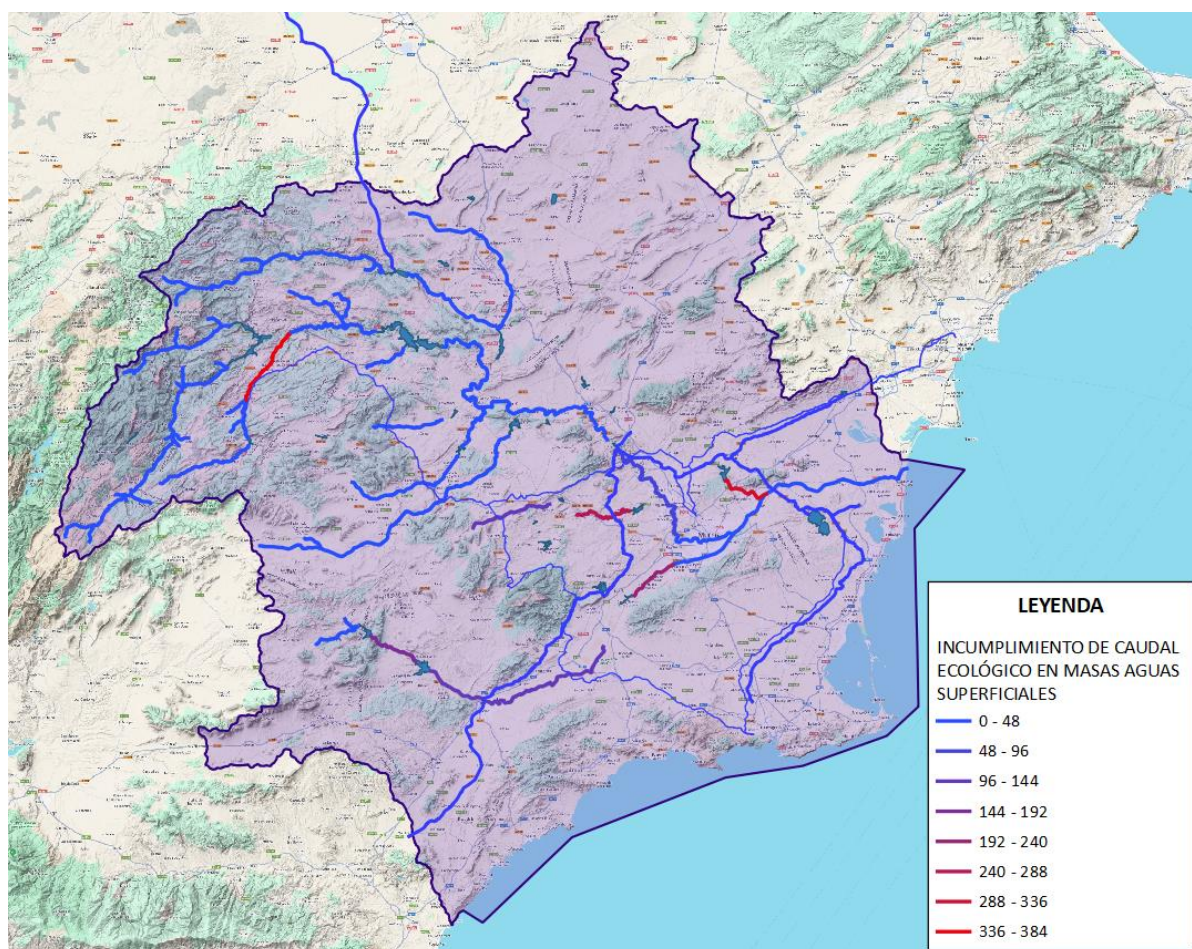
Gráfico 33. Relación entre aportaciones al sistema y emisión de CO<sub>2</sub>. Serie histórica

### 10.1.5. VERIFICACIÓN DE CUMPLIMIENTO CAUDALES ECOLÓGICOS

Para la verificación de cumplimiento de caudales ecológicos es necesario conocer los caudales en las masas de aguas superficiales en el período histórico obtenidas del modelo de Aquatool- SIMGES realizado por la Confederación Hidrográfica del Segura (PHDS 2015/21) y el Índice de Estado de Sequía para cada intervalo de tiempo analizado, para lo cual se ha consultado con información de la serie histórica publicada por el mismo organismo gestor.

El dato del caudal mínimo en estado normal o sequía se ha extraído del Plan Especial de Sequias de la Demarcación (2018) como se ha indicado en el *Capítulo 5.5 "VERIFICACIÓN DE CUMPLIMIENTO DE CAUDAL ECOLÓGICO"* y forma parte del fichero de detalles de la herramienta.

Para la representación de resultados de incumplimientos de caudales ecológicos en masas de aguas superficiales se ha optado por esquematizarlas en mapa de la región ya que es la manera más clara de visualizar lo evaluado por la herramienta ambiental, esquematizando con rampa creciente de colores de menos a más, la cantidad de veces en que se **incumple** con los caudales mínimos recomendados por la Confederación Hidrográfica del Segura.



*Ilustración 15. Incumplimiento de caudales ecológicos en masas de aguas superficiales. Serie histórica  
(\* Colores rojos representan masas con mayor cantidad de incumplimientos.*

En el mapa de la *Ilustración 15* se observa que existen masas que en todo el período histórico han presentado caudales mayores a los mínimos requeridos (representados en la por el color azul) y otras masas que en numerosas oportunidades no han llegado a cumplir con el caudal mínimo a lo largo de los años (color rojo).

En la siguiente tabla, se presentan las masas de agua superficiales en donde se producen más de 100 incumplimientos mensuales sobre los 384 valores evaluados correspondientes al período histórico.

*Tabla 26.* Masas de agua superficiales con mayor cantidad de incumplimiento de caudales ecológicos. Serie histórica

Masa de agua		Cantidad de veces que incumple Qeco	Porcentaje de incumplimiento
ES0701011104	Río Taibilla desde arroyo de Herrerías hasta confluencia con río Segura	384	100%
ES0701012004	Rambla Salada	314	82%
ES0702082503	Río Mula desde el río Pliego hasta embalse de Los Rodeos	298	78%
ES0701012304	Río Guadalentín desde el embalse del Romeral hasta el Reguerón	256	67%
ES0701010207	Río Luchena hasta embalse de Puentes	215	56%
ES0701010209	Río Guadalentín antes de Lorca desde embalse de Puentes	213	55%
ES0701010203	Río Guadalentín desde Lorca hasta surgencia de agua	148	39%
ES0701012303	Río Mula hasta el embalse de La Cierva	132	34%
ES0701010205	Río Segura desde el Azud de Ojós a depuradora aguas abajo de Archena	129	34%
ES0701010206	Río Segura desde depuradora de Archena hasta Contraparada	129	34%

El río Taibilla, ubicado en la cabecera de la cuenca, es el único que presenta un porcentaje de incumplimiento del 100%, lo cual es preocupante ya que representa que en todo el período histórico nunca ha alcanzado el caudal mínimo requerido según el PES de la demarcación (2018).

La Rambla Salada, que incumple con el caudal mínimo en el 82% de meses evaluados, se ubica aguas debajo del embalse de Santomera, lo cual significa que el caudal de agua superficial que escurrirá por la mencionada rambla depende directamente de las sueltas del embalse y la forma en que se gestione el mismo.

En cuanto al Río Guadalentín, se debe mencionar que ocurren incumplimientos en varios tramos, siendo el tramo de aguas abajo del embalse de Romeral el de situación más perjudicada. Este Río es uno de los principales afluentes del Río Segura, ubicado en el sur en donde se localiza la mayor producción agrícola.

## 10.2. RESULTADOS SIMULACIÓN ENTORNO SIAGES PERÍODO ESTACIONAL

En este apartado se presentarán los resultados obtenidos en el proyecto SIAGES, a partir de datos de predicciones meteorológicas realizadas para el período estacional de 7 meses descritas en el *Capítulo 8” RESUMEN ESCENARIOS SIMULADOS”*.

Se debe recordar que los datos de caudales, volúmenes y niveles piezométricos que se introducirán en los evaluadores se extraen de líneas de trabajo precedentes de SIAGES, herramienta de soporte para la **toma de decisiones en tiempo real**. Es importante resaltar que, al ser un corto período de tiempo, los resultados obtenidos dependen de las condiciones iniciales consideradas en cada uno de los modelos que forman parte del proyecto.

A igual que en la evaluación hidroeconómica realizada en período estacional, los resultados presentados corresponden a datos de “**simulación de gestión**”.

En este capítulo se representa únicamente el resultado detallado de estaciones depuradoras de aguas residuales a modo de ejemplo, ya que el comportamiento de todos los elementos del SRH evaluados resultan ser análogos a lo expuesto en los resultados del evaluador hidroeconómico (*Ver 9.2 RESULTADOS SIMULACIÓN ENTORNO SIAGES PERÍODO ESTACIONAL*)

### 10.2.1. ESTACIONES DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES

Las series dinámicas que funcionan de input en el evaluador ambiental se extraen de líneas precedentes del entorno SIAGES, como se ha comentado anteriormente. En la siguiente tabla se presentan directamente los resultados obtenidos.

Tabla 27. Resumen de emisiones de CO<sub>2</sub> semanales de depuradoras. Entorno SIAGES - período estacional

EDAR	EMISIONES [TonCO <sub>2</sub> /semana]					
	MIN	Percentil 25	Percentil 50	Percentil 75	MAX	PROMEDIO
Abarán	145,60	739,20	1478,40	2273,60	3024,00	1496,69
Algorfa	<b>2990,44</b>	<b>6977,70</b>	<b>9440,07</b>	<b>16557,21</b>	<b>21099,24</b>	<b>11142,96</b>
Archena	76,89	2405,20	4666,23	9277,19	13186,54	5626,06
Benejúzar	11,87	83,07	338,21	456,87	640,81	293,90
Calasparra	29,99	1784,30	2978,83	4208,35	5847,70	3016,82
Caravaca	100,14	2225,61	3194,46	4045,65	5447,60	3140,38
Cieza	399,35	1492,79	2942,80	3774,77	5838,06	2842,33
Hellín Mingogil	144,40	791,81	2387,46	4510,18	6247,82	2760,66
Moratalla	57,85	558,21	966,03	1443,26	1712,24	953,69
Orihuela	8,92	229,80	441,75	642,54	928,12	432,82

De manera análoga a lo expresado en el apartado 9.2.3 “DEPURADORAS DE AGUAS RESIDUALES”, la EDAR de Algorfa es la de mayor generación de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y es también la de mayor consumo energético de todas las depuradoras incluidas en el evaluador. La siguen las

depuradoras de Archena, Caravaca y Calasparra, que su consumo energético es medio, pero las tres son las que mayores recursos depurados aportan al sistema.

A continuación, se exponen los valores promedios semanales de caudales depurados y emisiones de CO<sub>2</sub> para el período estacional evaluado, en donde se aprecia con claridad que las mayores emisiones son las generadas por la EDAR Algorfa.

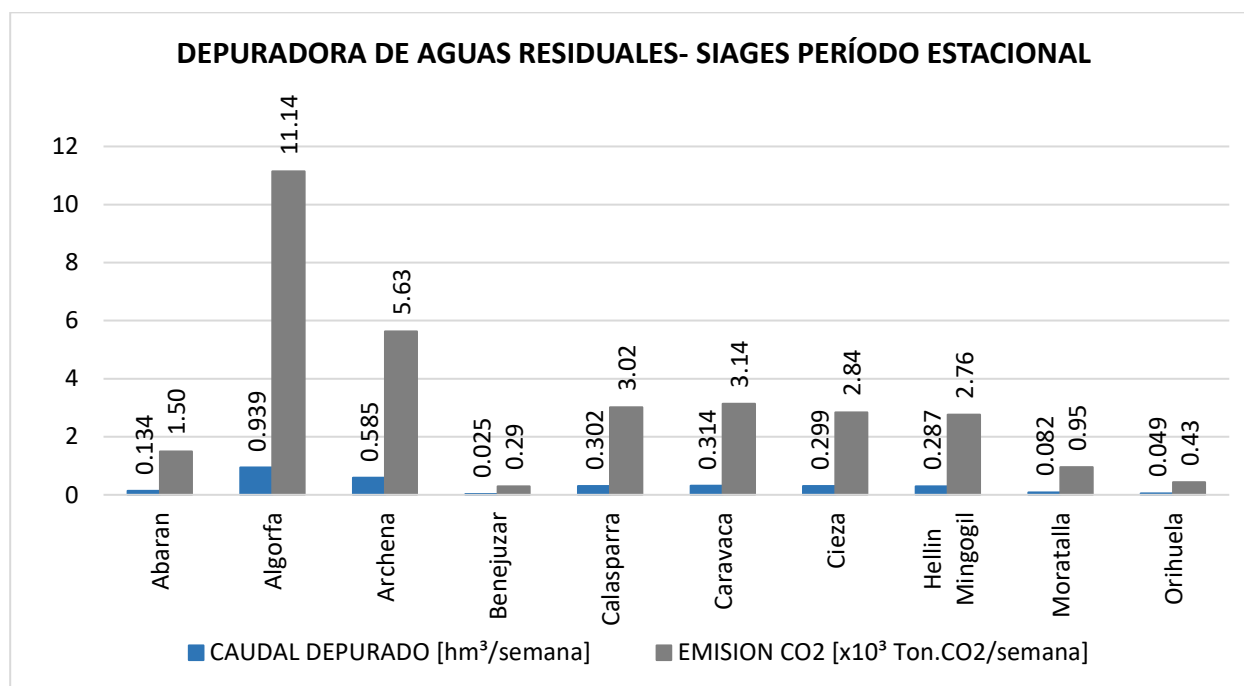


Gráfico 34. Promedios semanales de caudal depurado y emisiones de CO<sub>2</sub>. Entorno SIAGES - período estacional

Como se ha expresado en el capítulo de resultados del evaluador hidroeconómico, la EDAR Algorfa es la de mayor aportes de recursos al sistema y se ubica próxima a la UDA 46 “Tradicional Vega Baja” en donde la reutilización directa e indirecta de aguas depuradas ocupa el segundo lugar en aportes de recursos para satisfacción de demandas agrarias.

### 10.2.2. EMISIONES DE CO<sub>2</sub> IMPULSIONES, DESALADORAS, DEPURADORAS Y BOMBEO

En este apartado se evalúan en conjunto los cuatro elementos del Sistema de Recursos Hídricos analizados en el período estacional dentro del entorno SIAGES, obteniendo como resultado el Gráfico 35, en donde se ha combinado gráfico de áreas apiladas (elementos del SRH) y gráfica lineal (volumen de agua suministrada).

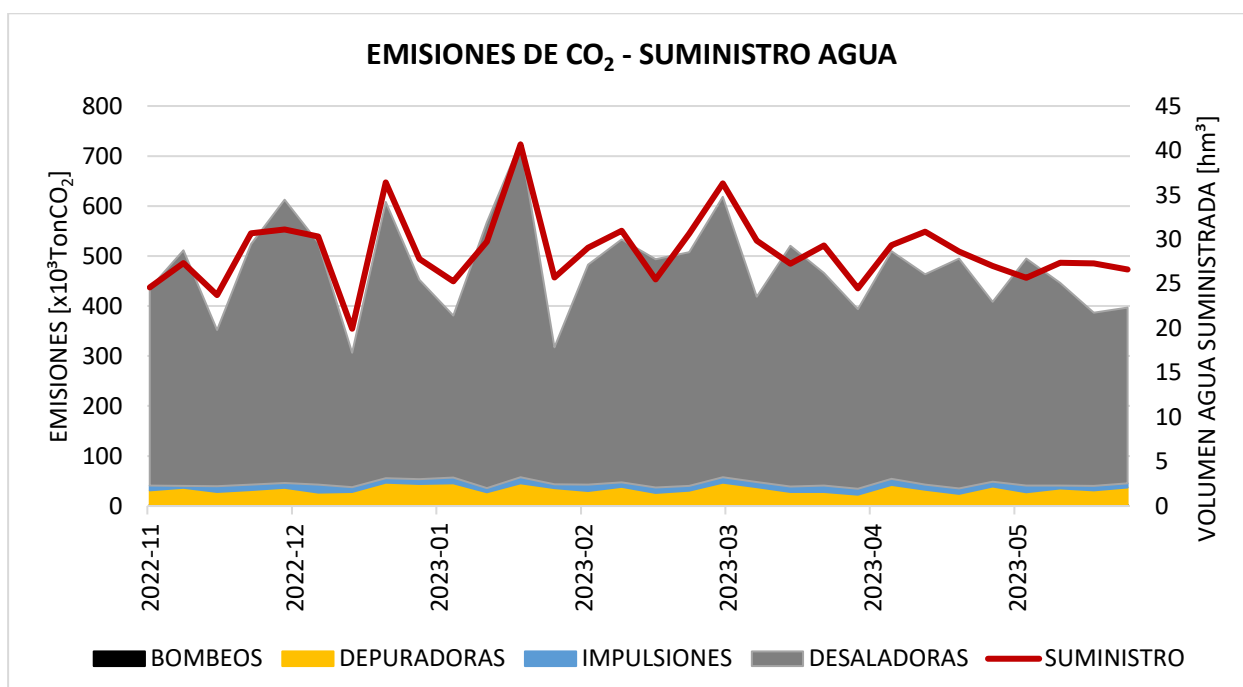


Gráfico 35. Emisiones CO<sub>2</sub> acumuladas en el sistema y volumen de agua suministrada. Entorno SIAGES - período estacional

De la gráfica se desprende que para las predicciones realizadas para el período estacional, se espera que en promedio, el 90% de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera resulten de procesos de desalación, un 7% debido a depuradoras y el 3% restante debido a bombeos ya sea debido a trasvases o a aguas subterráneas. Este resultado viene de la mano con el mayor consumo energético que presentan estas instalaciones para la producción de recursos.

En relación con la tendencia de la curva de agua suministrada, se puede apreciar el máximo de caudales demandados por el sistema de recursos hídricos para los meses de enero y febrero, los cuales coinciden con las máximas emisiones de CO<sub>2</sub>.

### 10.2.3. VERIFICACIÓN DE CUMPLIMIENTO CAUDALES ECOLÓGICOS

En cuanto a la verificación de cumplimiento de caudales ecológicos en el entorno de SIAGES, es necesario citar que dentro de la LÍNEA 1: METEO, se estiman los índices de estado de sequía para el período estacional, proporcionando como resultado el valor del Índice de Estado de Sequía (IES) mensual para cada zona territorial de sequía y el índice global para toda la cuenca.

Por otro lado, la LÍNEA 2: HIDRO, brinda resultados de caudales diarios en cada una de las masas de agua que componen la Demarcación Hidrográfica del Segura.

Combinando la información resultante de las dos líneas de trabajo precedentes, con el archivo de detalles internos que caracteriza los caudales mínimos, se ha podido comprobar si **diariamente** se cumplen o no los caudales mínimos establecidos en el Plan Especial de Sequías de la Demarcación Hidrográfica del Segura (2018).

Luego, se ha acumulado la cantidad de situaciones en que se **incumplen** los caudales mínimos con el fin de esquematizar el porcentaje de fallas sobre el total de días evaluados en un mapa de la Demarcación (Ver *Ilustración 16*).

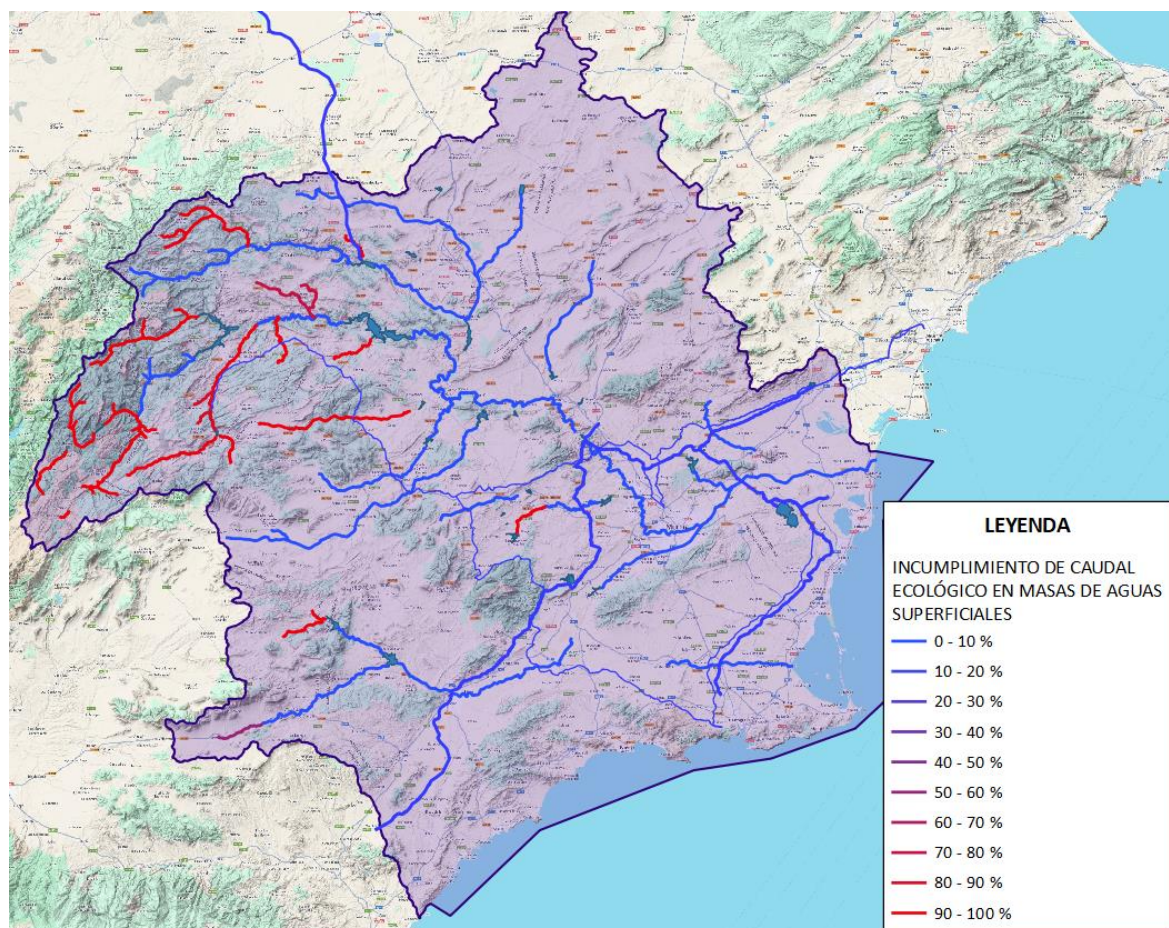


Ilustración 16. Incumplimiento de caudales ecológicos en masas de aguas superficiales.  
Entorno SIAGES - período estacional

(\*) Colores rojos representan masas con mayor cantidad de incumplimientos.

En color rojo se han representado aquellos tramos de aguas superficiales conflictivos. La mayoría de los sectores con fallas de incumplimiento de caudales ecológicos se encuentran en tramos de cabecera para los meses noviembre 2022 a mayo de 2023, según las predicciones realizadas en el entorno SIAGES.

En la *Tabla 28*, se presentan las masas de agua superficiales en donde se produce más del 90% de incumplimientos diarios para el período estacional en el entorno de SIAGES. Se ha resaltado el tramo de “*Río Taibilla desde arroyo de Herrerías hasta confluencia con río Segura*” porque es el único en el que también se han identificado fallas para la evaluación realizada para el período histórico presentada en el Capítulo 10.1.5.

Tabla 28. Masas de agua superficiales con mayor cantidad de incumplimiento de caudales ecológicos.  
Entorno SIAGES - período estacional

Masa de agua		Porcentaje de incumplimiento
ES0701010201	Río Caramel	100 %
ES0701010501	Arroyo Benizar	100 %
ES0701010701	Río Tus aguas arriba del Balneario de Tus	100 %
ES0701011101	Río Taibilla hasta confluencia con embalse del Taibilla	100 %
ES0701011104	<b>Río Taibilla desde arroyo de Herrerías hasta confluencia con río Segura</b>	<b>100 %</b>
ES0701011201	Arroyo Blanco hasta confluencia con embalse del Taibilla	100 %
ES0701011301	Rambla de Letur	100 %
ES0701011401	Río Bogarra hasta confluencia con el río Mundo	100 %
ES0701011801	Río Alhárabe hasta camping La Puerta	100 %
ES0701011802	Río Alhárabe aguas abajo de camping La Puerta	100 %
ES0701012401	Río Pliego	100 %
ES0702081601	Rambla de Talave	100 %
ES0701010702	Río Tus desde Balneario de Tus hasta embalse de la Fuensanta	98 %
ES0701010103	Río Segura desde embalse de Anchuricas hasta confluencia con río Zumeta	97 %
ES0701010101	Río Segura desde cabecera hasta embalse de Anchuricas	94 %
ES0701010401	Río Zumeta desde su cabecera hasta confluencia con río Segura	94 %

### 10.3. RESULTADOS SIMULACIÓN ENTORNO SIAGES A CORTO PLAZO

El proyecto SIAGES, es una herramienta de apoyo a la toma de decisiones en la gestión del Recurso Hídrico en tiempo real, el período a corto plazo parte de predicciones meteorológicas para 15 días. Como se ha presentado en el apartado 9.3 “RESULTADOS SIMULACIÓN ENTORNO SIAGES A CORTO PLAZO”, SIAGES contempla diferentes opciones de procesamiento: simulación gestión, optimización gestión y optimización hidroeconómica.

Como se ha mencionado en cuantiosas ocasiones, las emisiones de CO<sub>2</sub> se han estimado de manera proporcional al consumo energético, por lo cual la tendencia de todas las gráficas de cada uno de los elementos evaluados del SRH, resultan similares a las ya presentadas al momento de realizar la evaluación hidroeconómica. Sólo se presenta a modo de ejemplo la gráfica de emisiones totales para representar de manera general los resultados obtenidos.

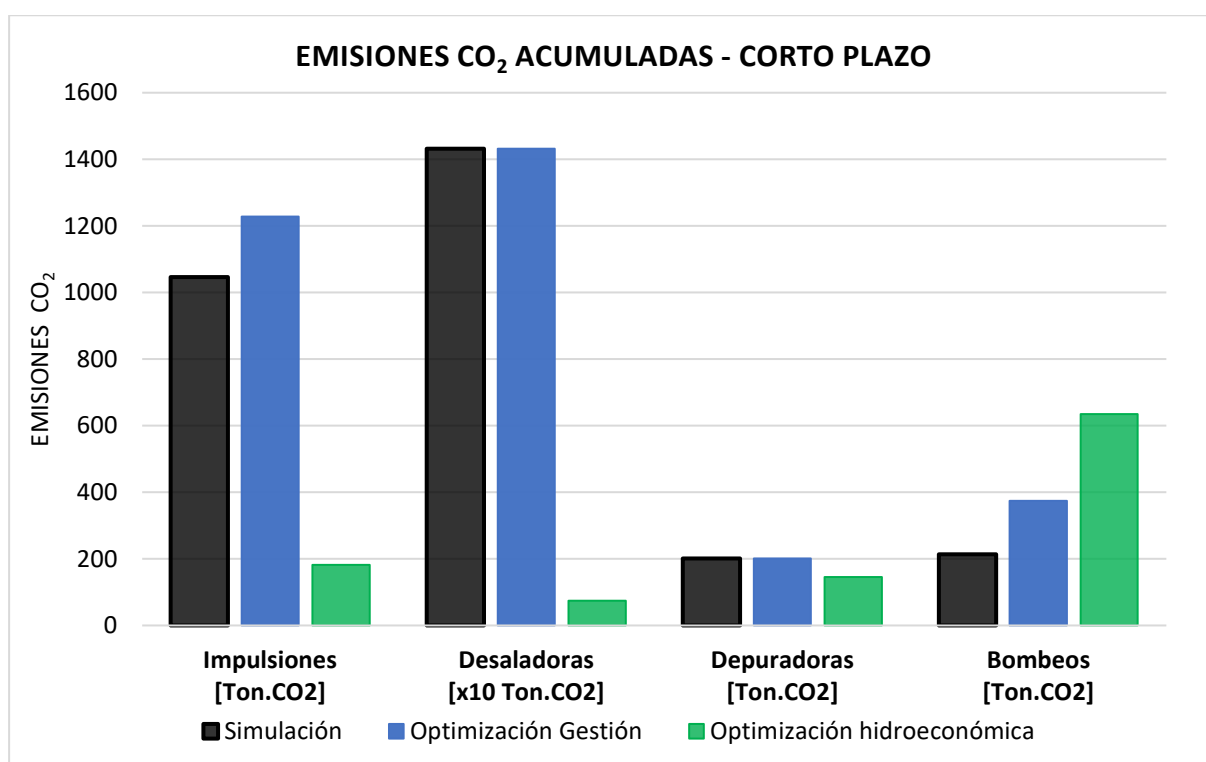
Es necesario recordar, que en el período a corto plazo no se realiza la verificación de caudales ecológicos ya que no se cuenta la información de índices de estado de sequía en periodo inferior a un mes.



### 10.3.1. EMISIONES DE CO<sub>2</sub> TOTALES A CORTO PLAZO

En el *Gráfico 36*, se analizan las emisiones de dióxido de carbono acumuladas para los 15 días del período a corto plazo, con el fin de comparar los resultados de simulación y las dos posibles optimizaciones.

Se debe resaltar que los datos correspondientes a impulsiones, depuradoras y bombeos se encuentran en TonCO<sub>2</sub>, mientras que las desaladoras se han representado en x10 TonCO<sub>2</sub>, con el fin de apreciar mejor la gráfica.



*Gráfico 36.* Emisiones CO<sub>2</sub> acumuladas entorno SIAGES. Período corto plazo

Los resultados obtenidos indican que las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas en la simulación de gestión y optimización de gestión otorgan valores similares, resultando la optimización solo un 2% mayor al comparar el total, debido a mayores bombeos.

Al considerar la optimización hidroeconómica, las emisiones disminuyen notablemente, representando en el total solo un 11% al compararla con la optimización de gestión. Esto ocurre debido a que disminuyen notablemente los suministros de demandas por parte de desaladoras que son las que más emisiones de CO<sub>2</sub> generan.

## 10.4. VALIDACIÓN DE LA HERRAMIENTA

De igual manera que se ha validado el evaluador hidroeconómico es necesario evaluar la bondad del evaluador ambiental comprobando si los resultados obtenidos se asemejan a las emisiones de dióxido de carbono registradas en la Demarcación Hidrográfica del Segura.

En el caso de impulsiones en el sistema superficial e instalaciones desaladoras de agua de mar, se ha recopilado información de Anuarios de la Mancomunidad de Canales de Taibilla (MCT) de los años 2018, 2019, 2020 y 2021.

### 10.4.1. IMPULSIONES EN EL SISTEMA SUPERFICIAL

En las publicaciones anuales de la MCT se incluye la información de consumo energético anual, factura energética y emisiones de CO<sub>2</sub> de la impulsión de Ojós. Se han introducido los caudales impulsados para los años 2018 a 2021 para comparar los resultados con los publicados en los respectivos anuarios y se exponen en los *Gráfico 37*, *Gráfico 38* y *Gráfico 39*.

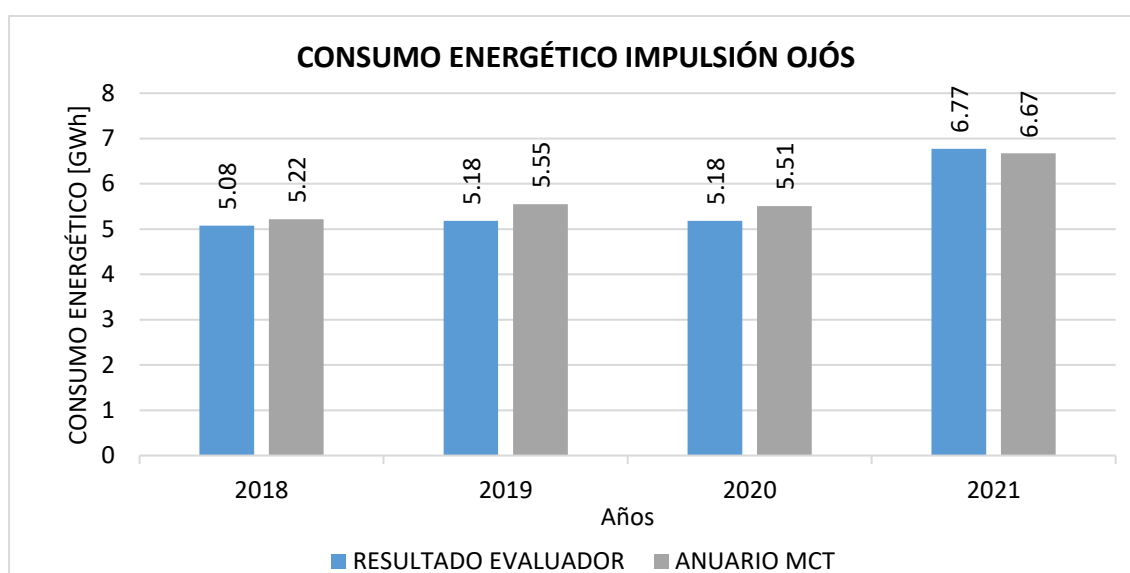


Gráfico 37. Consumo energético impulsión de Ojós período 2018 – 2021.

Los resultados obtenidos por medio del evaluador son muy próximos a los registrados por la Mancomunidad de Canales del Taibilla.

Las leves diferencias se pueden adjudicar a que la caracterización de las impulsiones en el evaluador los valores representativos (consumo energético, coste de energía y factor de emisión) son constantes para los 4 años de análisis.

Se aprecia que para el año 2020 el evaluador subestima los consumos energéticos, costes y emisiones, pero en el año 2021 los sobrestima. Esto se debería ajustar con parámetros que sean variables en los evaluadores desarrollados.

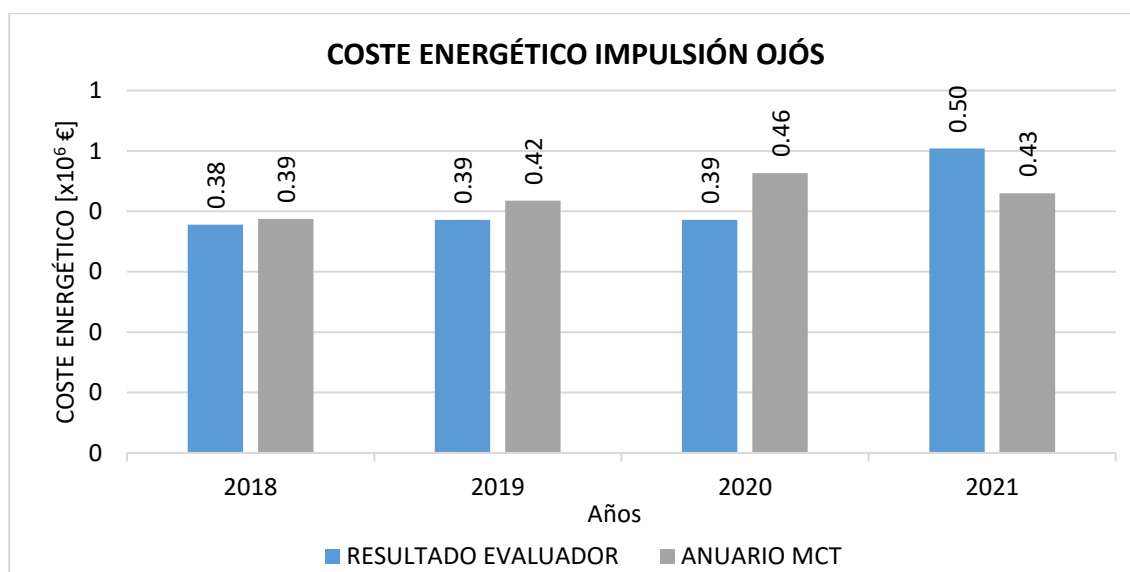


Gráfico 38. Coste energético impulsión de Ojós período 2018 – 2021.

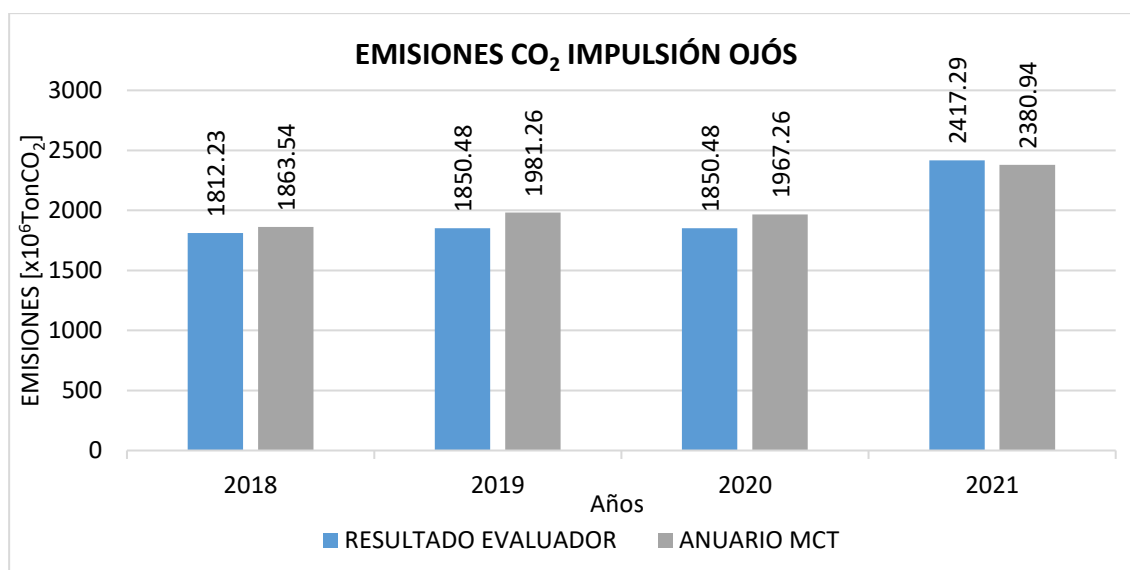


Gráfico 39. Emisiones de CO<sub>2</sub> impulsión de Ojós período 2018 – 2021

#### 10.4.2. INSTALACIONES DESALADORAS DE AGUA DE MAR

En las publicaciones anuales de la MCT, se cuenta con información de producción anual de agua desalada, consumos energéticos anuales, factura energética y emisiones de CO<sub>2</sub>. Se han introducido los datos de caudales producidos en el evaluador económico y ambiental para poder comparar los resultados con los publicados en los mencionados anuarios.

En cuanto al consumo energético, los resultados obtenidos con el evaluador son mayores a los que en realidad se registraron por el organismo gestor, lo cual se puede deber a simplificaciones realizadas en el modelo.

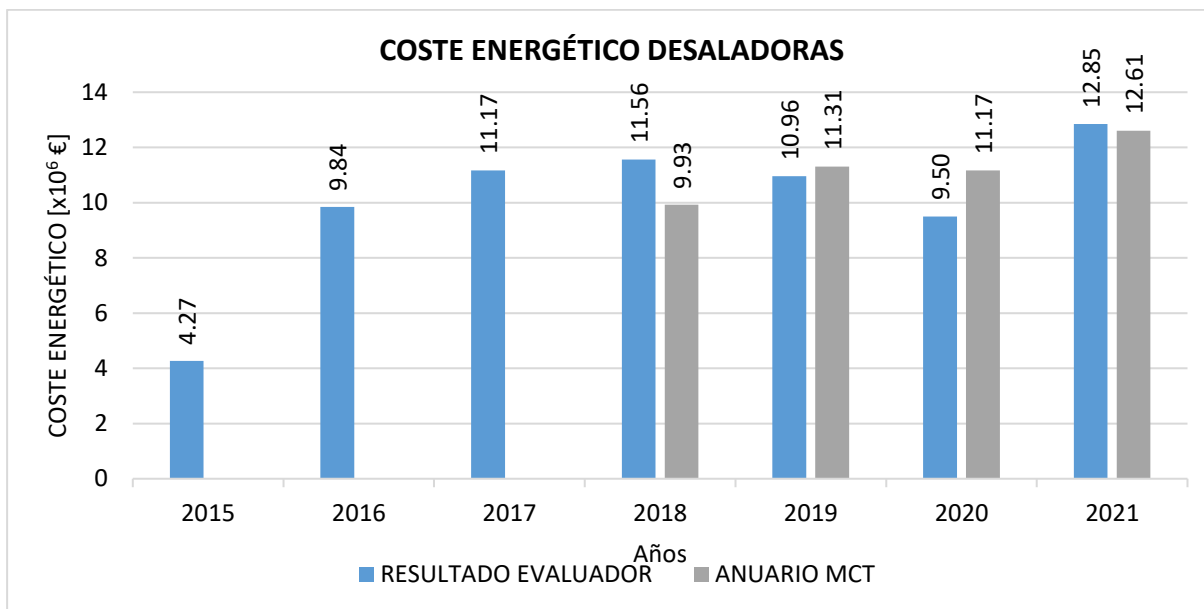


Gráfico 40. Coste energético desaladoras MCT período 2015 – 2021.

El coste energético estimado varía con respecto a lo que ha tenido que abonar el organismo gestor, lo cual se debe a que como precio de energía se ha adoptado un valor promedio para los 6 años de análisis y en la realidad el coste de la energía varía año a año.

La misma situación se tiene en relación a las emisiones de CO<sub>2</sub>, ya que se han caracterizado las emisiones por una tasa promedio entre los años de análisis.

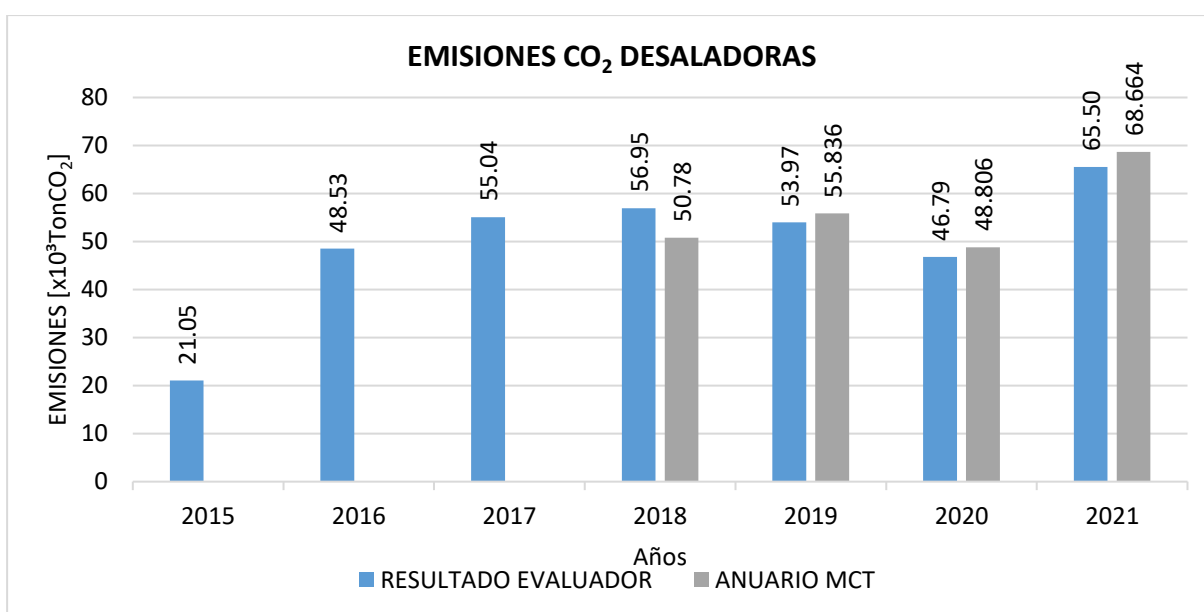


Gráfico 41. Emisiones de Dióxido de Carbono desaladoras MCT período 2015 – 2021

## 11. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

Se realizó análisis de sensibilidad del evaluador hidroeconómico aplicado al coste de operación de las cuatro desaladoras de agua de mar de mayor influencia en el sistema de recursos hídricos estudiado en el período histórico.

Se ha propuesto duplicar el coste de la energía, para luego comparar los costes de operación para ambas situaciones.

En la siguiente gráfica se han representado en líneas continuas los costes de operación de las desaladoras para el valor de energía considerado originalmente en el evaluador hidroeconómico (0,069€/kWh) y en líneas de trazos los costes de operación para el valor de energía duplicado (0,138€/kWh)

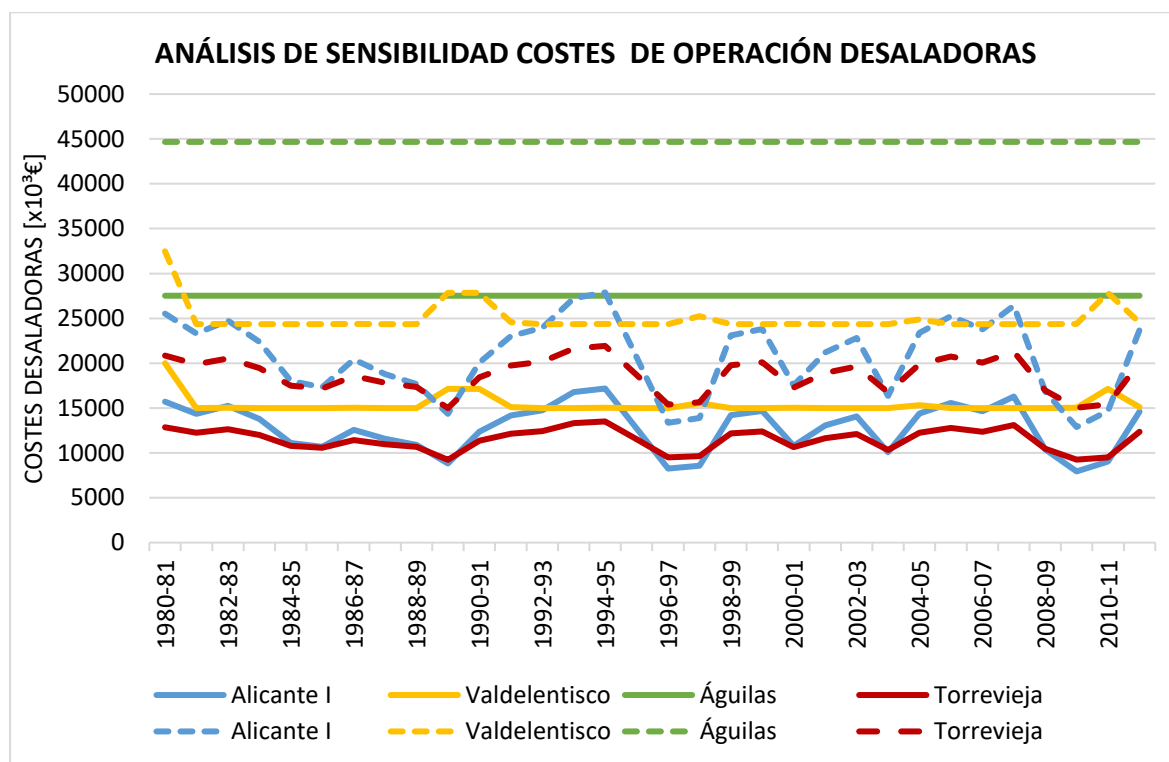


Gráfico 42. Análisis de sensibilidad coste de operación desaladoras. Serie histórica

Se empleó la fórmula de Hopkins, para estimar la sensibilidad relativa

$$S_k = \frac{\frac{\Delta c}{c}}{\frac{\Delta k}{k}} \quad \text{Ecuación 18}$$

En donde,

- $S_k$ : sensibilidad relativa de c a k

- $c$ : variable de estado (coste de operación de desaladoras)
- $k$ : parámetro considerado (coste de energía)

Se evaluó el  $S_k$  para cada intervalo de tiempo  $\Delta t$  de las cuatro desaladoras de mayor influencia en el sistema. El resultado para toda la serie de datos fue uniforme igual a **0,623**. Lo que significa que ante un incremento del 100% en el coste de la energía, los costes de operación de las desaladoras se incrementan en un 62,3%.

Lo demostrado representa la gran influencia del coste de la energía en los costes de desalación de agua, es por ello que en muchos casos se aplican subsidios a su producción y se está en búsqueda de nuevas tecnologías en las instalaciones para que sean más eficientes.

## 12. CONCLUSIONES, LIMITACIONES Y LÍNEAS FUTURAS

---

### 12.1. CONCLUSIONES GENERALES

Como conclusión del proyecto de fin de máster realizado se considera que se han alcanzado las expectativas desarrollando evaluadores hidroeconómicos y ambientales modulares, flexibles, de simple adaptación a la gestión de cualquier SRH, funcionan con datos dinámicos y se adecuan fácilmente a distintos escenarios, según la serie de datos que se tenga a disposición.

Las herramientas desarrolladas son capaces de compatibilizarse con los resultados obtenidos de diversos modelos multidisciplinares, facilitando la centralización de información y dotando de robustez a las evaluaciones realizadas. En esencia, los evaluadores resultan ser posprocesadores generalistas, diseñados de forma holística en donde se han incluido virtualmente todos los posibles elementos que componen a un SRH. Se han presentado evaluaciones costes de operación, beneficios económicos y estimación de emisiones de CO<sub>2</sub> de impulsiones en el sistema superficial, instalaciones desaladoras de agua de mar, estaciones depuradoras de aguas residuales, bombeos de aguas subterráneas para suministro de demandas agrarias y centrales hidroeléctricas. Se considera, que dada su naturaleza modulable los evaluadores permiten incorporar o suprimir elementos con gran facilidad sin demandar conocimientos de programación profundos. Esto facilita su aprovechamiento por todo tipo de usuarios.

Los evaluadores se consideran de notable utilidad para los organismos gestores de cuencas, ya que cuentan con el novedoso potencial de ser soporte para la toma de decisiones en **tiempo real**, realizando simulaciones y optimizaciones a partir de predicciones meteorológicas y aprovechando información en tiempo real ya capturada y de amplio conocimiento por los organismos gestores.

Las metodologías de análisis propuestas permiten identificar con facilidad los elementos del SRH de mayor influencia hidroeconómica, lo cual es favorable para optimizar la gestión del recurso. Además, permiten evaluar cómo se relacionan entre sí los elementos y qué consecuencias causan en los costes.

Otra cuestión para destacar, por parte de los evaluadores aplicados a bombeos de aguas subterráneas, es el empleo de alturas de elevación dinámicas, ya sea por estar vinculada a modelo matemático de aguas subterráneas o por empleo de relaciones entre nivel piezométrico y volumen de acuífero. Esta característica supone un factor diferenciador frente a otro tipo de modelos de evaluación hidroeconómica que no tienen un enfoque especializado en recursos subterráneos.

Por su parte, el evaluador ambiental resulta ser una solución innovadora, ya que brinda al usuario la posibilidad de estimar emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera con una metodología simplificada y de rápida ejecución, lo que la convierte en una potente y novedosa herramienta, ya que no se han encontrado en la búsqueda bibliográfica evaluadores de naturaleza similar.

Adicionalmente, el evaluador ambiental posibilita la verificación de cumplimiento de caudales ecológicos en masas de agua superficiales, variable de importante peso socioambiental en la actualidad de elevada incidencia al momento de tomar decisiones por parte de los organismos gestores.

## 12.2. CONCLUSIONES REFERIDAS A CASO DE ESTUDIO

Se ha presentado como caso de estudio la aplicación de las herramientas en la Demarcación Hidrográfica del Segura, cuenca de reconocida complejidad, que satisface las demandas urbanas, rurales e industriales por medio de uso conjunto de recursos superficiales, subterráneos, trasvasados, desalados y reutilizados, obteniendo resultados consistentes.

El SRH analizado, es un sistema complejo y altamente interconectado, que requirió de intensas búsquedas bibliográficas para lograr a caracterizar adecuadamente todos los elementos introducidos en los evaluadores.

En los resultados obtenidos, se destaca la importancia que tiene la **desalación** en toda la demarcación. Es la fuente no convencional de recursos de mayor peso en el sistema, con elevado coste de operación y altas emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. En el análisis de sensibilidad realizado, ha quedado demostrado el fuerte vínculo que existe entre el coste de operación de desaladoras y coste energético.

A su vez, al analizar los resultados hidroeconómicos de bombeos de aguas subterránea para los distintos escenarios simulados, resultó ser siempre el de menor coste de operación, lo cual justifica la sobreexplotación de acuíferos que existe en la demarcación.

Sin dudas, para otros sistemas más simples, la herramienta sería de mucha utilidad con una calibración- validación sin mayores complejidades.

## 12.3. LIMITACIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En cuanto a las limitaciones de los evaluadores, se destaca el empleo de un único valor promedio para el coste de energía, siendo este un valor que fluctúa constantemente. A futuro, se podría permitir que el coste sea variable en el tiempo y dependiente de los kWh consumidos.

Con respecto a la incorporación de elementos de bombeo dinámicos en la evaluación, se encuentra que, si bien se está en la capacidad de ofrecer resultados más robustos y ajustados a la realidad, su implementación está restringida a la disponibilidad de información piezométrica por telemetría en tiempo real o constantemente actualizada que permita su explotación.

Una posible incorporación es incluir los costes de inversiones iniciales en las instalaciones del sistema, costes financieros y demás aspectos intervinientes en el balance económico total de cada



instalación, con el fin de poder estimar costes y beneficios **totales**. El caso de estudio únicamente ha considerado costes de operación del sistema enfocados a la toma de decisiones en tiempo real.

En cuanto a las Unidades de Demanda Agraria se han incluido en los evaluadores el valor de margen neto de cada una de ellas y el beneficio se ha estimado a partir del factor de reducción de producción estimado por líneas precedentes de SIAGES. Esta cuestión se mejoraría notablemente incluyendo **curvas de rendimiento** de cada una de las UDAs. No es lo mismo si se consideran las predicciones de precipitaciones para el período Enero-Julio o de Mayo-Noviembre, la producción de cultivos será muy diferente según el período de tiempo considerado.

Con respecto a las **emisiones de Dióxido de Carbono**, se deberían mejorar los evaluadores con estimaciones más detalladas. Lo propuesto es una metodología simplificada directamente proporcional a la energía consumida por cada instalación.

Otra cuestión por completar es la emisión de dióxido de carbono por parte de las centrales hidroeléctricas, que es un tema aún en investigación y no se cuenta con información clara para su evaluación.

### 13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

ACUAMED - [www.acuamed.es](http://www.acuamed.es) (Marzo 2023)

ACUAMED. Ministerio de agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2014) *“La desalación en España. Sostenibilidad para zonas vulnerables”*.

ACUAMED. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2022) *“Agua sostenible, riqueza natural. Memoria de actividades 2021”*.

AGRUPAL – ESAMUR (2020) *“Guía práctica para la depuración de aguas residuales en la industria alimentaria”*.

Andreu Álvarez, J. (1993) *“Conceptos y métodos para la planificación hidrológica”*. Universidad Politécnica de Valencia

Andreu, J., Solera, A., Capilla, J., Ferrer, J. *“Modelo SIMGES de Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos, incluyendo Utilización conjunta. Versión 3.03.01. Manual de Usuario”* – Universidad Politécnica de Valencia.

AQUATOOL - <https://aquatool.webs.upv.es/aqt/> (Abril 2024)

Assaf, H., Van Beek, E., Borden, C., Gijsbers, P., Jolma, A., Kaden, S., Kaltofen, M., Labadie, J.W., Loucks, D.P., Quinn, N.W.T., Sieber, J., Sulis, A., Werick, W.J. and Wood, D.M. (2008) *“Generic simulation models for facilitating stakeholder involvement in water resources planning and management: A comparison, evaluation, and identification of future needs”*. Environmental Modelling, Software and Decision Support, 1574-101X.

Bielsa, J., Duarte, R., (2001). *“An economic model for water allocation in north Eastern Spain”*. Int. J. Water Resource. Dev. 173, 397–408, doi: 10.1080/07900620120065165

Calatrava, J., Martínez Granados, D. (2012) *“El valor de uso del agua en el regadío de la cuenca del Segura y en las zonas regables del trasvase Tajo-Segura”*. Economía Agraria y Recursos Naturales. ISSN: 1578-0732. e-ISSN: 2174-7350. Vol. 12, 1. (2012). pp. 5-32, doi:10.7201/earn.2012.01.01.

Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX – 2019) *“Comisión central de explotación del Acueducto Tajo-Segura. Informe de situación”*

CNMC - [data.cnmc.es/energia/precio-mercado/2021-definitivos](http://data.cnmc.es/energia/precio-mercado/2021-definitivos) (Julio 2023)

Comisión para el PACTO PROVINCIAL DEL AGUA (2018) *“Pacto provincial del agua. Alicante”*

Confederación Hidrográfica del Segura. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (2015) *“Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura 2015/21”*

Confederación Hidrográfica del Segura. Ministerio para la Transición Ecológica (2018) *“Revisión del Plan Especial de Sequía. Demarcación Hidrográfica del Segura”*

Confederación Hidrográfica del Segura. Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico (2021) *“Propuesta de Proyecto de Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Segura”*.

Custodio, E., Andreu Rodes, J.M., Aragón, R., Estrela, T., Ferrer, J., García Aróstegui, J.L., Manzano, M., Rodríguez Hernández, L., Sahuquillo, A., Del Villar, A. (2016) *“Groundwater intensive use and mining in south-eastern peninsular Spain: Hydrogeological, economic and social aspects”*. Science of The Total Environment, Volume 559, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.02.107>

Entidad Pública de Saneamiento de Aguas Residuales de la Comunitat Valenciana (2022) *“Memoria de gestión 2021”*

EPSAR - [www.epsar.gva.es/estaciones-depuradoras-por-municipios](http://www.epsar.gva.es/estaciones-depuradoras-por-municipios) (Marzo 2023)

ESAMUR - [www.esamur.com](http://www.esamur.com) (Marzo 2023)

Ferrer Polo, J., Aguado García, D., Barat Baviera, R., Serralta Sevilla, J., Lapuente Ojeda, E. (2016) *“Huella energética en el ciclo integral del agua en la Comunidad de Madrid”*. IIAMA – UPV. Fundación Canal.

Foster, T., Brozovic, N., and Butler, A. P. (2014). *“Modeling irrigation behavior in groundwater systems.”* Water Resour. Res. 50, 6370–6389. doi: 10.1002/2014WR015620

Generalitat de Catalunya - [canviclimatic.gencat.cat/](http://canviclimatic.gencat.cat/) (Marzo 2023)

Gohar, A. A., Amer, S. A., and Ward, F. A. (2015). *“Irrigation infrastructure and water appropriation rules for food security”*. J. Hydrol. 520, 85–100. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.11.036

Harou, J.J., Pulido Velázquez, M., Rosenberg, D.E., Medellín-Azuara, J., Lund, J.R., Howitt, R.E. (2009). *“Hydro-economic models: concepts, design, applications, and future prospects”*. J. Hydrol. 375, 627–643, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.06.037>.

IAGUA - [www.iagua.es/data/infraestructuras/edar/hellin](http://www.iagua.es/data/infraestructuras/edar/hellin) (Marzo 2023)

Instalación fotovoltaica para la desaladora de Escombreras en la ciudad de Cartagena, Murcia España - [issuu.com/tomsign/docs/escombreras2](http://issuu.com/tomsign/docs/escombreras2) (Marzo 2023)

Mancomunidad de Canales de Taibilla - [www.mct.es](http://www.mct.es) (Marzo 2023)

Mancomunidad de Canales del Taibilla. Ministerio para la Transición Ecológica. (2019) *“La gestión del servicio 2018”*.

Mancomunidad de Canales del Taibilla. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2020) *“La gestión del servicio 2019”*.

Mancomunidad de Canales del Taibilla. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2021) *“La gestión del servicio 2020”*.

Mancomunidad de Canales del Taibilla. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2022) *“La gestión del servicio 2021”*.

Maninder Singh Dhillon, Samanpreet Kaur, Anil Sood & Rajan Aggarwal. (2018) *“Estimation of carbon emissions from groundwater pumping in central Punjab”*, Carbon Management, 9:4, 425-435, DOI: 10.1080/17583004.2018.1518107

Martínez Álvarez, V., Maestre Valero, J.F., González Ortega, M.J., Gallego Elvira, B., Martín Gorriz, B. (2019) *“Characterization of the agricultural supply of desalinated seawater in Southeastern Spain”*, Water 2019, 11, 1233. <https://doi.org/10.3390/w11061233>

Martínez Cebrián (2019) *“Consumo de energía para la depuración de agua en España”*. Trabajo Final de Máster. Universidad de Alcalá de Henares.

Melgarejo Moreno, J., Fernández Mejuto, M. (2020) *“El Agua en la Provincia de Alicante”*. Diputación provincial de Alicante. Área de Ciclo Hídrico.

Melgarejo Moreno, J., Molina Giménez, A. (2010) *“Incidencia del Traspase Tajo-Segura en la provincia de Alicante”*. Fundación COEPA, Fundación de la CV Agua y Progreso

Melgarejo Moreno, J., Montañó Sans, B. (2009) *“La eficiencia energética del trasvase Tajo-Segura”*. Cuides, octubre 09 – Nº3

Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2012) *“La energía en España 2012”*

Ministerio de Medio Ambiente (2004) *“Memoria ambiental comparativa entre las actuaciones urgentes en las cuencas del Mediterráneo y la alternativa al proyecto de transferencias autorizadas por el Artículo 13 de la Ley 10/2001, de 5 de julio, del Plan Hidrológico Nacional”*.

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2023) BOE-A-2023-5003 *“Orden TED/157/2023, de 21 de febrero, por la que se establece la excepción temporal y parcial al principio de recuperación de costes del artículo 111 bis del texto refundido de la Ley de Aguas, para el aprovechamiento de recursos hídricos procedentes de desalinizadoras de agua de mar en la Cuenca Hidrográfica del Segura, en la provincia de Almería y en la conducción Júcar-Vinalopó.”*

Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (2023) *“Factores de emisión. Registro de huella de carbono, compensación y proyectos de absorción de Dióxido de Carbono”*. OECC

Mishra, V., Asoka, A., Vatta, K., & Lall, U. (2018) "Groundwater depletion and associated CO<sub>2</sub> emissions in India". *Earth's Future*, 6, 1672–1681. <https://doi.org/10.1029/2018EF000939>

Morote, A.F., Rico, A.M., Moltó, E. (2017) "Critical review of desalination in Spain: a resource for the future?". *Geographical Research*, November 2017, doi: 10.1111/1745-5871.12232

Morote, A-F., Hernández, M., Rico, A-M., Eslamian, S. (2020) "Inter-basin water transfer conflicts. The case of the Tagus-Segura Aqueduct (Spain)". *Int. J. Hydrology Science and Technology*, Vol 10, No.4,2020. <https://doi.org/10.1504/IJHST.2020.108267>

OMIE - <https://www.omie.es> (Abril 2024)

Pricewaterhouse Coopers Asesores de Negocios, S.L. (2020). "Impacto económico del trasvase Tajo-Segura en Alicante, Almería y Murcia". Sindicato Central de Regantes del Acueducto Tajo-Segura

Pulido Velázquez, M. (2003) "Optimización económica de la gestión del uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas en un Sistema de Recursos Hídricos". Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.

Pulido Velázquez, M., Cabrera, E y Garrido, A. (2014) "Economía del agua y gestión de los recursos hídricos". *Ingeniería del Agua*. 18.1

Red Eléctrica de España (2021) "Emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la generación de electricidad en España". Grupo Red Eléctrica

Rupérez Moreno, C., Senent Aparicio, J., Martínez Vicente, D., García Aróstegui, J.L., Cabezas Calvo Rubio, F., Pérez Sánchez, J. (2017) "Sustainability of irrigated agriculture with overexploited aquifers: The case of Segura basin". *Agricultural Water Management* 182, <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2016.12.008>

Sistema europeo de negociación de CO<sub>2</sub> - [www.sendeco2.com/es](http://www.sendeco2.com/es) (Abril 2024)

Varol, M. (2019) "CO<sub>2</sub> emissions from hydroelectric reservoirs in the Tigris River basin, a semi-arid region of southeastern Turkey". *Journal of Hydrology*, Volume 569, 2019, doi:0.1016/j.jhydrol.2019.01.002

Villar García, A. (2014) "El coste energético de la desalación en el programa A.G.U.A". *Investigaciones Geográficas*, (62), 101–112. <https://doi.org/10.14198/INGEO2014.62.07>

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* 2020, 12, 2408; doi:10.3390/w12094080

Wang, W., Roulet, N.T., Kim, Y., Strachan, I.B., Del Giorgio, P., Prairie, Y.T., Tremblay, A. (2018) *“Modelling CO<sub>2</sub> emissions from water Surface of a boreal hydroelectric reservoir”*. Science of the Total Environment 612 (2018) 392–404, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.203>

Ward, F.A., Pulido Velázquez, M. (2008). *“Efficiency, equity, and sustainability in a water quantity? quality optimization model in the Rio Grande basin”*. Ecol. Econ. 66, 23–37, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.08.018>

WEAP - <https://www.weap21.org/index.asp> (Abril 2024)

Wood, W. W., & Hyndman, D. W. (2017), *“Groundwater Depletion: A Significant Unreported Source of Atmospheric Carbon Dioxide”*, Earth’s Future, 5, 1133–1135, <https://doi.org/10.1002/2017EF000586>

Zarzo Martínez, D. (2020) *“La Desalación del Agua en España”* – FADEA. Estudios sobre la Economía Española 2020/22

Zhang, L., Chen, S. (2022) *“Carbon peaks of water systems in Chinese cities under varying water demand dynamics and energy transition pathways”*. Journal of Cleaner Production, Volume 379, Part 1, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.134695>