



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Dpto. de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

Inclusión de índices de escasez en la planificación hidrológica y análisis de medidas de gestión: aplicación a la cuenca del río Mijares.

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente

AUTOR/A: Villar Barraza, Hugo Diego

Tutor/a: Paredes Arquiola, Javier

Cotutor/a: Bergillos Meca, Rafael Jesús

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

# Trabajo Fin de Máster

## *INCLUSIÓN DE ÍNDICES DE ESCASEZ EN LA PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA Y ANÁLISIS DE MEDIDAS DE GESTIÓN: APLICACIÓN A LA CUENCA DEL RÍO MIJARES*

**Intensificación:**

***ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS***

**Autor:**

***HUGO DIEGO VILLAR BARRAZA***

**Tutor:**

***DR. JAVIER PAREDES ARQUIOLA***

**Cotutor:**

***DR. RAFAEL BERGILLOS MECA***

***JUNIO, 2023***



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

mihma  
máster en ingeniería  
hidráulica y medio ambiente



## Resumen del Trabajo de Fin de Máster

### Datos del proyecto

**Título del TFM en español:** Inclusión de índices de escasez en la planificación hidrológica y análisis de medidas de gestión: aplicación a la cuenca del río Mijares.

**Título del TFM en inglés:** Inclusion of scarcity indices in hydrological planning and analysis of management measures: application to the Mijares river basin.

**Título del TFM en Valenciano:** Inclusió d'índexs d'escassetat en la planificació hidrològica i anàlisi de mesures de gestió: aplicació a la conca del riu Millars.

**Alumno:** Hugo Diego Villar Barraza

**Tutor:** Dr. Javier Paredes Arquiola

**Cotutor:** Dr. Rafael Bergillos Meca

**Fecha de Lectura:** Junio, 2023

### Resumen

#### Resumen

Con el paso de los años la demanda de agua ha experimentado un crecimiento significativo. Aunado a ello, las sequías se presentan cada vez más frecuentes y severas, lo que genera una mayor reducción de la disponibilidad del recurso, exacerbando la escasez del agua. Las cuencas del Mediterráneo son especialmente vulnerables a estos efectos. En ese sentido, España se enfrenta a diversos desafíos en la gestión del agua, tal como la necesidad de evitar la sobreexplotación de acuíferos.

Ante la necesidad de contar con una gestión integral de los recursos hídricos que permita garantizar su conservación y sostenibilidad, los diferentes organismos desarrollaron instrumentos de planificación hidrológica a nivel de sistemas de explotación. Sin embargo, se ha evidenciado el riesgo de un desacople entre los Planes Hidrológicos y los Planes Especiales de Sequía, uno con una visión global y a largo plazo, y el otro enfocado en situaciones de escasez hídrica. Por esta razón, el presente trabajo tuvo como objetivo principal evaluar las medidas de gestión propuestas por el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar 2022-2027 para el sistema de explotación Mijares –

Plana de Castellón, incluyendo los criterios de escasez incluyendo los criterios de escasez impuestos por el Plan Especial de Sequía 2018.

Esta evaluación ha sido realizada sobre un caso de estudio al este de España, el sistema de explotación Mijares – Plana de Castellón, que forma parte de la Demarcación Hidrográfica del Júcar (DHJ). Actualmente presenta problemas de sobreexplotación de las masas de agua subterránea e intrusión salina, especialmente en la masa de agua subterránea Azuébar – Vall d’Uixó. Ante esta situación, se han planteado diversas medidas para mitigar los efectos adversos y garantizar un suministro sostenible, tales como la incorporación de recursos no convencionales (desalinización y reutilización).

Para el desarrollo del trabajo se utilizó el SSD AQUATOOL, en particular el programa SIMGES, que permitió elaborar un modelo de uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas a escala mensual en el que se incorporaron las reglas de operación en base a los estados de escasez hídrica definidos en el Plan Especial de Sequía de la DHJ. Posteriormente se implementaron las diferentes medidas propuestas por el Plan Hidrológico de la DHJ 2022-2027 tanto de forma separada como en conjunto para tratar los problemas presentes en el sistema y, por último, se evaluó la viabilidad del aumento de las demandas agrícolas según las asignaciones futuras previstas y con todas las medidas propuestas.

Al considerar los criterios de escasez en el modelo de gestión actual se encontró un aumento en el número de unidades de demanda agrícola con fallos en el cumplimiento de los criterios de garantía legales establecidos por la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH). De la evaluación de las medidas propuestas se determinó que la reutilización de las aguas regeneradas fue la más beneficiosa, reduciendo el bombeo en mayor medida y mejorando las garantías. Las otras medidas tuvieron un impacto comparativamente limitado. Al analizar las medidas en conjunto, se observó una mayor reducción del bombeo en el acuífero objetivo y mejoraron las garantías de algunas unidades. En cuanto a la contemplación de las asignaciones futuras, gracias a algunas medidas el bombeo es menor que en situación actual. La consideración de los criterios de escasez en la planificación es importante porque, como se demuestra en este trabajo, alteran los resultados del balance de la cuenca, el cumplimiento de las garantías de las demandas y la evolución de los niveles piezométricos de los acuíferos, entre otros.



## Resum

Amb el pas dels anys, la demanda d'aigua ha experimentat un creixement significatiu. A més, les sequeres es presenten cada vegada més freqüents i severes, la qual cosa genera una major reducció de la disponibilitat del recurs, exacerbant l'escassetat d'aigua. Les conques del Mediterrani són especialment vulnerables a aquests efectes. En aquest sentit, Espanya s'enfronta a diversos reptes en la gestió de l'aigua, com ara la necessitat d'evitar la sobreexplotació dels aquífers.

Davant la necessitat de comptar amb una gestió integral dels recursos hídrics que permeti garantir-ne la conservació i sostenibilitat, els diferents organismes han desenvolupat instruments de planificació hidrològica a nivell de sistemes d'explotació. No obstant això, s'ha evidenciat el risc d'un desacoblament entre els Plans Hidrològics i els Plans Especials de Sequera, un amb una visió global i a llarg termini, i l'altre centrat en situacions d'escassetat hídrica. Per aquesta raó, el present treball va tenir com a objectiu principal avaluar les mesures de gestió proposades pel Pla Hidrològic de la Demarcació Hidrogràfica del Xúquer 2022-2027 per al sistema d'explotació Millars – Plana de Castelló, incloent els criteris d'escassetat imposats pel Pla Especial de Sequera 2018.

Aquesta avaluació s'ha realitzat sobre un cas d'estudi a l'est d'Espanya, el sistema d'explotació Millars - Plana de Castelló, que forma part de la Demarcació Hidrogràfica del Xúquer (DHJ). Actualment presenta problemes de sobreexplotació de les masses d'aigua subterrània i intrusió salina, especialment en la massa d'aigua subterrània Azuébar - Vall d'Uixó. Davant d'aquesta situació, s'han plantejat diverses mesures per mitigar els efectes adversos i garantir un subministrament sostenible, com ara la incorporació de recursos no convencionals (dessalinització i reutilització).

Per al desenvolupament del treball, s'ha utilitzat el SSD AQUATOOL, en particular el programa SIMGES, que ha permès elaborar un model d'ús conjunt d'aigües superficials i subterrànies a escala mensual en el qual s'han incorporat les regles d'operació en base als estats d'escassetat hídrica definits en el Pla Especial de Sequera de la DHX. Posteriorment, s'han implementat les diferents mesures proposades pel Pla Hidrològic de la DHX 2022-2027 tant de forma separada com conjunta per abordar els problemes presents en el sistema, i finalment s'ha avaluat la viabilitat de l'augment de les demandes agrícoles segons les assignacions futures previstes i amb totes les mesures proposades.

En considerar els criteris d'escassetat en el model de gestió actual, s'ha observat un augment en el nombre d'unitats de demanda agrícola amb falles en el compliment dels criteris de garantia legals establerts per l'Instrucció de Planificació Hidrològica (IPH). De l'avaluació de les mesures proposades, s'ha determinat que la reutilització de les aigües regenerades és la més beneficiosa, reduint el bombeig en major mesura i millorant les garanties. Les altres mesures han tingut un impacte comparativament limitat. En analitzar les mesures en conjunt, s'ha observat una major reducció del bombeig en l'aqüífer objectiu i han millorat les garanties de algunes unitats. Pel que fa a la contemplació de les assignacions futures, gràcies a algunes mesures el bombeig és menor que en la situació actual. La consideració dels criteris d'escassetat en la planificació és important perquè, com es demostra en aquest treball, alteren els resultats del balanç de la conca, el compliment de les garanties de les demandes i l'evolució dels nivells piezomètrics dels aqüífers, entre altres.

#### **Abstract**

Over the years, water demand has experienced significant growth. In addition to this, droughts are becoming more frequent and severe, leading to a further reduction in water availability and exacerbating water scarcity. The Mediterranean basins are particularly vulnerable to these effects. In this regard, Spain faces various challenges in water management, such as the need to prevent overexploitation of aquifers.

Recognizing the necessity for comprehensive management of water resources to ensure their conservation and sustainability, different organizations have developed hydrological planning instruments at the system level. However, a decoupling risk between the Hydrological Plans and the Special Drought Plans has been evident, with one focusing on a global and long-term vision and the other addressing water scarcity situations. Therefore, the main objective of this study was to evaluate the management measures proposed by the Hydrological Plan of the Júcar River Basin District 2022-2027 for the Mijares – Plana de Castellón exploitation system, including the scarcity criteria imposed by the Special Drought Plan 2018.

This evaluation was conducted in a case study located in eastern Spain, the Mijares – Plana de Castellón exploitation system, which is part of the Júcar River Basin District (DHJ). Currently, this system faces issues of overexploitation of groundwater and saline



intrusion, particularly in the Azuébar – Vall d'Uixó groundwater body. To mitigate adverse effects and ensure sustainable supply, various measures have been proposed, such as the incorporation of non-conventional resources (desalination and wastewater).

For the development of this work, the SSD AQUATOOL, specifically the SIMGES program, was used to create a combined use model of surface and groundwater at a monthly scale, incorporating operational rules based on the defined water scarcity states in the DHJ Special Drought Plan. Subsequently, the different measures proposed by the Hydrological Plan of the DHJ 2022-2027 were implemented both separately and in combination to address the issues present in the system. Finally, the feasibility of increasing agricultural demands was evaluated based on the projected future allocations and with all the proposed measures.

When considering the scarcity criteria in the current management model, an increase in the number of agricultural demand units failing to meet the legal guarantee criteria established by the Hydrological Planning Instruction (IPH) was observed. From the evaluation of the proposed measures, it was determined that reclaimed water reuse was the most beneficial, reducing pumping to a greater extent and improving guarantees. The other measures had comparatively limited impact. Analysing the measures collectively, a greater reduction in pumping in the target aquifer was observed, and guarantees for some units improved. Regarding future allocations, some measures resulted in lower pumping than the current situation. Considering scarcity criteria in planning is important because, as seen, they alter the basin's water balance, the reliability of water demands and the evolution of the piezometric levels of the aquifers, among others.

**Palabras clave español:** Escasez; Sobreexplotación de acuíferos; Planificación hidrológica, Sistema de explotación Mijares – Plana de Castellón; Planes Especiales de Sequía

**Palabras clave valenciano:** Escassetat; Sobreexplotació d'aqüífers; Planificació hidrològica; Sistema d'explotació Millars – Plana de Castelló; Plans especials de sequera

**Palabras clave inglés:** Scarcity; Overexploitation of aquifers; Hydrological planning; Mijares – Plana de Castellon exploitation system; Special drought plans



## Agradecimientos

Quiero expresar mi sincero agradecimiento a todas las personas que me han apoyado en la realización del presente Trabajo Fin de Máster. En primer lugar, agradecer a mi familia y amigos por su constante apoyo y motivación durante todo mi periodo de maestrando.

También quiero expresar mi agradecimiento a mi tutor Dr. Javier Paredes Arquiola y a mi cotutor Dr. Rafael Bergillos Meca por su guía y asesoramiento en cada etapa del trabajo, sus aportes fueron de gran ayuda en la elaboración de este documento. Este trabajo se enmarca en el proyecto "Adaptive agreements on benefits sharing for managed aquifer recharge in the Mediterranean region - AGREEMAR" (PCI2022-133001, MCIN/AEI/10.13039/501100011033), financiado por la Unión Europea, el Ministerio de Ciencia e Innovación, y la Agencia Estatal de Investigación a través de los fondos NextGenerationEU y el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia.

Por último, pero no menos importante, quiero expresar mi gratitud al Gobierno Peruano, a través del Programa Nacional de Becas y Crédito Educativo – PRONABEC, por su apoyo financiero y poder brindarme la oportunidad de realizar este máster. Espero que esta inversión en mi educación contribuya de alguna manera al desarrollo de mi país.



## Índice

1. Introducción.....	1
2. Objetivos .....	3
3. Área de estudio .....	4
3.1. Descripción general .....	4
3.1.1. Demarcación Hidrográfica del Júcar .....	4
3.1.2. Sistema de explotación Mijares – Plana de Castellón.....	6
3.1.3. Cuencas hidrográficas del sistema de explotación .....	11
3.2. Problemática.....	12
4. Metodología.....	14
4.1. Recopilación y análisis de la información.....	14
4.1.1. Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar 2022-2027 .....	14
4.1.2. Plan Especial de Sequía 2018 .....	15
4.2. Elección del modelo de gestión.....	16
4.3. Definición de escenarios.....	17
4.4. Desarrollo del modelo conceptual de la gestión.....	19
4.4.1. Aportaciones naturales .....	19
4.4.2. Aportaciones no naturales .....	22
4.4.3. Embalses.....	23
4.4.4. Acuíferos.....	24
4.4.5. Conducciones .....	25
4.4.6. Caudales ecológicos .....	26
4.4.7. Demandas.....	27
4.4.8. Regla de operación.....	30
4.4.9. Tomas de agua superficial, subterránea, reutilización y desalinización .....	30
4.4.10. Centrales hidroeléctricas.....	32
4.4.11. Bombeos.....	32
5. Análisis de la situación actual del sistema .....	33
6. Análisis de la situación actual con restricciones del Plan Especial de Sequía .....	39
7. Análisis de las diferentes medidas de gestión del PHJ22/27 .....	48
7.1. Efecto de las depuradoras .....	48



7.2.	Efecto de la desalinizadora .....	54
7.3.	Efecto de la Balsa de Belcaire .....	55
7.4.	Efecto del embalse de María Cristina.....	60
8.	Análisis de la situación actual con restricciones del PES y medidas propuestas.....	65
9.	Análisis de las asignaciones futuras con las medidas propuestas y restricciones del PES72	
10.	Resumen comparativo de escenarios .....	79
11.	Conclusiones.....	86
12.	Referencias.....	88
13.	Anexos .....	91
13.1.	Suministros en el “Escenario PHJ” .....	91
13.2.	Suministros en el “Escenario Base” .....	91
13.3.	Suministros en el “Escenario Base + Reutilización” .....	92
13.4.	Suministros en el “Escenario Base + Desalinización” .....	92
13.5.	Suministros en el “Escenario Base + Balsa” .....	93
13.6.	Suministros en el “Escenario Base + MC” .....	93
13.7.	Suministros en el “Escenario Base + Medidas” .....	94
13.8.	Suministros en el “Escenario Asignaciones + Medidas” .....	95
13.9.	Resumen de resultados.....	96

## Índice de figuras

<b>Figura 1.</b> Demarcación Hidrográfica del Júcar (a) y sistema de explotación Mijares – Plana de Castellón en la DHJ (b).....	5
<b>Figura 2.</b> UDA del sistema de explotación Mijares – Plana de Castellón.....	8
<b>Figura 3.</b> Localización de las masas de agua superficiales con caudales ecológicos en la zona de estudio.....	10
<b>Figura 4.</b> Esquema topológico desarrollado en SIMGES para la zona de estudio. ....	20
<b>Figura 5.</b> Subcuencas de las aportaciones superficiales naturales consideradas en el modelo de gestión de la zona de estudio.....	21
<b>Figura 6.</b> Masas de agua subterránea consideradas en el modelo de gestión de la zona de estudio.....	24
<b>Figura 7.</b> UDA consideradas en el modelo de gestión de la zona de estudio.....	28
<b>Figura 8.</b> Distribución mensual de las demandas agrícolas en hm <sup>3</sup> consideradas en el modelo de gestión de la zona de estudio.....	29
<b>Figura 9.</b> Curva de restricción para los riegos mixtos del río Mijares en base a los volúmenes embalsados en Arenós y Sichar.....	30
<b>Figura 10.</b> Simulación de los volúmenes embalsados mensuales en Arenós y Sichar (hm <sup>3</sup> ) en el modelo de gestión de la zona de estudio. ....	33
<b>Figura 11.</b> Suministro a las demandas agrícolas (hm <sup>3</sup> ) en situación actual de la zona de estudio. ....	35
<b>Figura 12.</b> Suministro a las demandas agrícolas (hm <sup>3</sup> ) en situación actual en el modelo desarrollado en el PHJ22/27. ....	35
<b>Figura 13.</b> Simulaciones de recargas netas mensuales (hm <sup>3</sup> ) en los acuíferos en el modelo de gestión de la zona de estudio.....	37
<b>Figura 14.</b> Simulación de la energía hidroeléctrica producida anualmente (GWh) en el modelo de gestión de la zona de estudio.....	38
<b>Figura 15.</b> Curvas de volúmenes embalsados en Arenós y Sichar obtenidas para estimar el escenario de escasez en la zona de estudio.....	39
<b>Figura 16.</b> Esquema topológico en SIMGES de la zona de estudio con las reglas de operación. ....	42



<b>Figura 17.</b> Simulación mensual de los volúmenes embalsados en Arenós y Sichar ( $\text{hm}^3$ ) en situación actual sin y con los escenarios de escasez en el modelo de gestión de la zona de estudio.....	43
<b>Figura 18.</b> Suministro a las demandas agrícolas ( $\text{hm}^3$ ) en situación actual sin y con PES en la zona de estudio. ....	44
<b>Figura 19.</b> Variación mensual de la recarga neta del acuífero de la Plana de Castellón ( $\text{hm}^3$ ) en situación actual sin y con los escenarios de escasez en el modelo de gestión de la zona de estudio.....	45
<b>Figura 20.</b> Variación mensual de la recarga neta del acuífero de Azuébar – Vall d’Uixó ( $\text{hm}^3$ ) en situación actual sin y con los escenarios de escasez en el modelo de gestión de la zona de estudio.....	46
<b>Figura 21.</b> Suministro a las demandas agrícolas ( $\text{hm}^3$ ) en “Escenario Base” y “Escenario Base + Reutilización” en la zona de estudio. ....	51
<b>Figura 22.</b> Variación mensual de la recarga neta del acuífero de la Plana de Castellón ( $\text{hm}^3$ ) del “Escenario Base” y “Escenario Base + Reutilización” en el modelo de gestión de la zona de estudio.....	53
<b>Figura 23.</b> Variación mensual de la recarga neta del acuífero de Azuébar – Vall d’Uixó ( $\text{hm}^3$ ) del “Escenario Base” y “Escenario Base + Reutilización” el modelo de gestión de la zona de estudio.....	53
<b>Figura 24.</b> Suministro a las demandas agrícolas ( $\text{hm}^3$ ) en “Escenario Base” y “Escenario Base + Desalinización” en la zona de estudio.....	55
<b>Figura 25.</b> Curvas de volúmenes embalsados en Arenós y Sichar obtenidas para estimar el escenario de escasez y excedentes en la zona de estudio.....	56
<b>Figura 26.</b> Simulación mensual de los volúmenes embalsados en Arenós y Sichar ( $\text{hm}^3$ ) en “Escenario Base” y “Escenario Base + Balsa” el modelo de gestión de la zona de estudio.....	57
<b>Figura 27.</b> Suministro a las demandas agrícolas ( $\text{hm}^3$ ) en “Escenario Base” y “Escenario Base + Balsa” en la zona de estudio. ....	58
<b>Figura 28.</b> Variación mensual de la recarga neta del acuífero de la Plana de Castellón ( $\text{hm}^3$ ) del “Escenario Base” y “Escenario Base + Balsa” en el modelo de gestión de la zona de estudio. ....	59

<b>Figura 29.</b> Variación mensual de la recarga neta del acuífero de Azuébar – Vall d’Uixó (hm <sup>3</sup> ) del “Escenario Base” y “Escenario Base + Balsa” el modelo de gestión de la zona de estudio. .....	59
<b>Figura 30.</b> Simulación mensual de los volúmenes embalsados en Arenós y Sichar (hm <sup>3</sup> ) en “Escenario Base” y “Escenario Base + MC” el modelo de gestión de la zona de estudio. ....	61
<b>Figura 31.</b> Suministro a las demandas agrícolas (hm <sup>3</sup> ) en “Escenario Base” y “Escenario Base + MC” en la zona de estudio. ....	62
<b>Figura 32.</b> Variación mensual de la recarga neta del acuífero de la Plana de Castellón (hm <sup>3</sup> ) del “Escenario Base” y “Escenario Base + MC” en el modelo de gestión de la zona de estudio...	63
<b>Figura 33.</b> Variación mensual de la recarga neta del acuífero de Azuébar – Vall d’Uixó (hm <sup>3</sup> ) del “Escenario Base” y “Escenario Base + MC” el modelo de gestión de la zona de estudio..	63
<b>Figura 34.</b> Esquema topológico en SIMGES de la zona de estudio con las reglas de operación previas y nuevas. ....	66
<b>Figura 35.</b> Simulación mensual de los volúmenes embalsados en Arenós y Sichar (hm <sup>3</sup> ) en “Escenario Base” y “Escenario Base + Medidas” en el modelo de gestión de la zona de estudio. .....	67
<b>Figura 36.</b> Suministro a las demandas agrícolas (hm <sup>3</sup> ) en “Escenario Base” y “Escenario Base + Medidas” en la zona de estudio.....	68
<b>Figura 37.</b> Variación mensual de la recarga neta del acuífero de la Plana de Castellón (hm <sup>3</sup> ) del “Escenario Base” y “Escenario Base + Medidas” en el modelo de gestión de la zona de estudio. .....	70
<b>Figura 38.</b> Variación mensual de la recarga neta del acuífero de Azuébar – Vall d’Uixó (hm <sup>3</sup> ) del “Escenario Base” y “Escenario Base + Medidas” el modelo de gestión de la zona de estudio. .....	70
<b>Figura 39.</b> Simulación mensual de los volúmenes embalsados en Arenós y Sichar (hm <sup>3</sup> ) en “Escenario Base + Medidas” y “Escenario Asignaciones + Medidas” el modelo de gestión de la zona de estudio. ....	74
<b>Figura 40.</b> Suministro a las demandas agrícolas (hm <sup>3</sup> ) en “Escenario Base + Medidas” y “Escenario Asignaciones + Medidas” en la zona de estudio.....	75
<b>Figura 41.</b> Variación mensual de la recarga neta del acuífero de la Plana de Castellón (hm <sup>3</sup> ) del “Escenario Base + Medidas” y “Escenario Asignaciones + Medidas” en el modelo de gestión de la zona de estudio. ....	77



**Figura 42.** Variación mensual de la recarga neta del acuífero de Azuébar – Vall d’Uixó ( $\text{hm}^3$ ) del “Escenario Base + Medidas” y “Escenario Asignaciones + Medidas” el modelo de gestión de la zona de estudio. .... 77

**Figura 43.** Simulación de la energía hidroeléctrica producida anualmente (GWh) en “Escenario Base + Medidas” y “Escenario Asignaciones + Medidas” en el modelo de gestión de la zona de estudio..... 78



## Índice de tablas

<b>Tabla 1.</b> Superficie de la Demarcación Hidrográfica del Júcar por comunidad autónoma. ....	4
<b>Tabla 2.</b> Recurso renovable, total de restricciones y recurso disponible ( $\text{hm}^3/\text{año}$ ) de los acuíferos de mayor relevancia en la zona de estudio.....	7
<b>Tabla 3.</b> Volumen depurado ( $\text{hm}^3/\text{año}$ ) en situación actual de las EDAR de mayor relevancia en la zona de estudio. ....	9
<b>Tabla 4.</b> Volumen anual depurado en situación actual, reutilizado e incluido en el modelo de gestión en $\text{hm}^3$ . ....	23
<b>Tabla 5.</b> Capacidad máxima y volumen mínimo por cada embalse en $\text{hm}^3$ .....	23
<b>Tabla 6.</b> Caudales ecológicos mensuales en $\text{hm}^3$ por masa de agua superficial consideradas en el modelo de gestión de la zona de estudio. ....	27
<b>Tabla 7.</b> Coeficientes de consumo, retorno y pérdidas para cada una de las UDA.....	29
<b>Tabla 8.</b> Capacidad máxima de suministro ( $\text{hm}^3/\text{año}$ ) de las distintas fuentes suministradas a las UDA en el modelo de gestión de la zona de estudio.....	31
<b>Tabla 9.</b> Características de las centrales hidroeléctricas consideradas en el modelo de gestión de la zona de estudio. ....	32
<b>Tabla 10.</b> Suministro promedio anual en $\text{hm}^3$ a las UDA de la zona de estudio. ....	34
<b>Tabla 11.</b> Porcentaje de reducción de los suministros en función del escenario de escasez en la zona de estudio. ....	40
<b>Tabla 12.</b> Porcentaje de capacidad autorizado de recursos extraordinarios en función del escenario de escasez en la zona de estudio.....	40
<b>Tabla 13.</b> Promedio anual de energía eléctrica producida (GWh) por cada central hidroeléctrica en situación actual sin y con los escenarios de escasez en la zona de estudio.	47
<b>Tabla 14.</b> Volumen anual depurado, reutilizado e incluido en el modelo de gestión ( $\text{hm}^3$ ) en el “Escenario Base + Reutilización”.....	49
<b>Tabla 15.</b> Porcentaje de capacidad autorizado de recursos excepcionales permitidas de reutilización y de pozos de sequía en función del escenario de escasez de la zona de estudio. ....	50
<b>Tabla 16.</b> Reservas anuales establecidas por el PHJ16/21 y propuestas en el PHJ22/27 ( $\text{hm}^3$ ) en la zona de estudio. ....	72



<b>Tabla 17.</b> Capacidad de suministro anual máximo en $\text{hm}^3$ según origen del recurso a las UDA consideradas en el modelo de gestión de la zona de estudio. ....	73
<b>Tabla 18.</b> Capacidad de suministro anual máximo y reservas en $\text{hm}^3$ según origen de los recursos a las UDA consideradas en el modelo de gestión de la zona de estudio. ....	73
<b>Tabla 19.</b> Resumen de resultados de los modelos en el “Escenario PHJ” y “Escenario Base” en la zona de estudio. ....	80
<b>Tabla 20.</b> Resumen de resultados de los modelos en el “Escenario Base”, “Escenario Base + Reutilización”, “Escenario Base + Desalinización”, “Escenario Base + Balsa” y “Escenario Base + MC” en la zona de estudio. ....	82
<b>Tabla 21.</b> Resumen de resultados de los modelos en el “Escenario Base” y “Escenario Base + Medidas” en la zona de estudio. ....	84
<b>Tabla 22.</b> Resumen de resultados de los modelos en el “Escenario Base + Medidas” y “Escenario Asignaciones + Medidas” en la zona de estudio. ....	85



## ABREVIACIONES – Acrónimos

IPH	Instrucción de Planificación Hidrológica
CEDEX	Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas
PHJ	Plan Hidrológico del Júcar
DHJ	Demarcación Hidrográfica del Júcar
CGR	Comunidad General de Regantes
DTR	Documento Técnico de Referencia
UDU	Unidad de Demanda Urbana
UDA	Unidad de Demanda Agrícola
UDH	Unidad de Demanda Hidroeléctrica
UDT	Unidad de Demanda Termoeléctrica
PES	Plan Especial de Sequía
IDAM	Instalación Desaladora de Agua de Mar
EDAR	Estación Depuradora de Agua Residual
UTE	Unidad Territorial de Escasez Coyuntural
UTS	Unidad Territorial de Sequía Prolongada
SSD	Sistema de Soporte a la Decisión

## 1. Introducción

El agua es un recurso vital y limitado en la mayoría de las regiones del mundo. La creciente demanda de agua para fines agrícolas, industriales y domésticos, impulsada por el crecimiento demográfico, ha provocado una escasez paulatina de este recurso a lo largo del tiempo. La necesidad humana que más demanda de este recurso es la agricultura, debido a que utiliza el 70% de todas las extracciones de ríos, lagos y acuíferos (Ruiz, 2020; Iturria et al., 2019). Aunado a ello, la contaminación de las fuentes, la sequía a causa del cambio climático, la sobreexplotación de los recursos y el uso ineficiente del agua (Carlosama y Granda, 2022) han generado mayores reducciones del recurso disponible que agravan la escasez hídrica al no contar con la capacidad de poder satisfacer estas demandas en su totalidad.

Considerando que los recursos hídricos están bajo una presión cada vez mayor, se espera que la situación empeore en los próximos años debido al cambio climático (Martínez, 2021). Las sequías, que son parte natural de los procesos climáticos, se han vuelto cada vez más frecuentes y severas por este motivo (González, 2021). Es importante tenerlas en cuenta porque en estos periodos se presentan precipitaciones deficitarias que generan, por consecuencia, reducciones de las escorrentías y las recargas de los acuíferos.

Estos problemas generan una necesidad cada vez mayor de contar con una gestión integral de los recursos hídricos en los sistemas de explotación que permitan garantizar su conservación y sostenibilidad. Es por ello que las administraciones públicas y los diferentes organismos encargados de la planificación hidrológica tienen la tarea de impulsar políticas orientadas a estos fines (Ruiz, 2020).

Las cuencas del Mediterráneo se caracterizan por ser una región con una alta presión sobre los recursos hídricos, lo que la hace vulnerable a los efectos del cambio climático (Cabrera, 2021). Debido a su clima mediterráneo, estas cuencas presentan una alta variabilidad espaciotemporal de las precipitaciones, con sequías en verano y eventos de lluvias intensas en invierno (Palacios, 2022).

España, en particular, posee una cultura de la gestión del agua y con grandes obras de regulación, sin embargo, sigue enfrentándose a importantes desafíos en el uso sostenible del recurso hídrico, tal como reducir la sobreexplotación de acuíferos (Macian et al., 2021), lo cual se puede agravar por efecto de la sequía. En este contexto de escasez hídrica, los recursos no

convencionales (reutilización y desalinización) son una alternativa crucial que debe ser considerada para abordar y mitigar los problemas de escasez hídrica (Martínez, 2021).

El sistema de explotación de recursos hídricos Mijares – Plana de Castellón presenta problemas de intrusión marina ocasionada por la sobreexplotación del acuífero en la zona baja de la Plana de Castellón, generando así, el empobrecimiento de la cantidad y calidad de esta masa de agua.

El Plan Hidrológico del Júcar 2022-2027 (PHJ22/27) abarca una visión integral de la gestión el agua en el sistema de explotación a largo plazo. En ella se proponen diversas medidas con la finalidad de tratar el problema. Sin embargo, no se incluyen los criterios establecidos por el Plan Especial de Sequía 2018 (PES), el cual detalla la gestión de los recursos en situaciones de escasez hídrica. Al ser integrados ambos documentos es posible que se vean modificadas las conclusiones del PHJ22/27.

Es por ello que en el presente Trabajo de Fin de Máster (TFM) se desarrollan una serie de escenarios a fin de determinar el impacto de cada una de las medidas propuestas en el PHJ22/27 de forma separada y conjunta sobre el sistema de explotación incluyendo los criterios de escasez establecidos en el PES, que generan variaciones en los suministros y en los caudales ecológicos. El análisis de los resultados permitirá extraer conclusiones orientadas a una mejora en la planificación y gestión de los recursos hídricos superficiales, subterráneos y no convencionales en el sistema de explotación.

El trabajo se desarrolla en seis puntos principales:

- Introducción
- Metodología
- Análisis de la situación actual del sistema sin y con los criterios de escasez
- Análisis de las diferentes medidas de gestión propuestas en el PHJ22/27
- Análisis del impacto de las asignaciones futuras
- Conclusiones del trabajo realizado

## 2. Objetivos

El objetivo principal del presente Trabajo Fin de Máster (TFM) es evaluar las medidas de gestión propuestas por el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar 2022-2027 para el sistema de explotación Mijares – Plana de Castellón, incluyendo los criterios impuestos por el Plan Especial de Sequía 2018 referidos a la escasez hídrica.

Para lograr este objetivo general, se han definido distintos objetivos específicos:

- Desarrollar un modelo de gestión de la situación actual del sistema de explotación y validado mediante la comparación con los resultados del PHJ22/27.
- Incluir en el modelo desarrollado las diferentes reglas de operación derivadas de los escenarios de escasez impuestos por el PES.
- Realizar un análisis del impacto individual y en conjunto de las medidas de gestión contempladas en el PHJ22/27 sobre el sistema de explotación.
- Analizar el impacto en la gestión de los recursos en el sistema de explotación considerando las asignaciones futuras en las demandas agrícolas.

### 3. Área de estudio

#### 3.1. Descripción general

El sistema de explotación Mijares – Plana de Castellón se encuentra dentro de la Demarcación Hidrográfica del Júcar y comprende las cuencas hidrográficas de los ríos Mijares, Belcaire, Seco y Veo, y todas las subcuencas litorales comprendidas entre Benicasim y los límites de Castellón y Valencia (Figura 1a).

##### 3.1.1. Demarcación Hidrográfica del Júcar

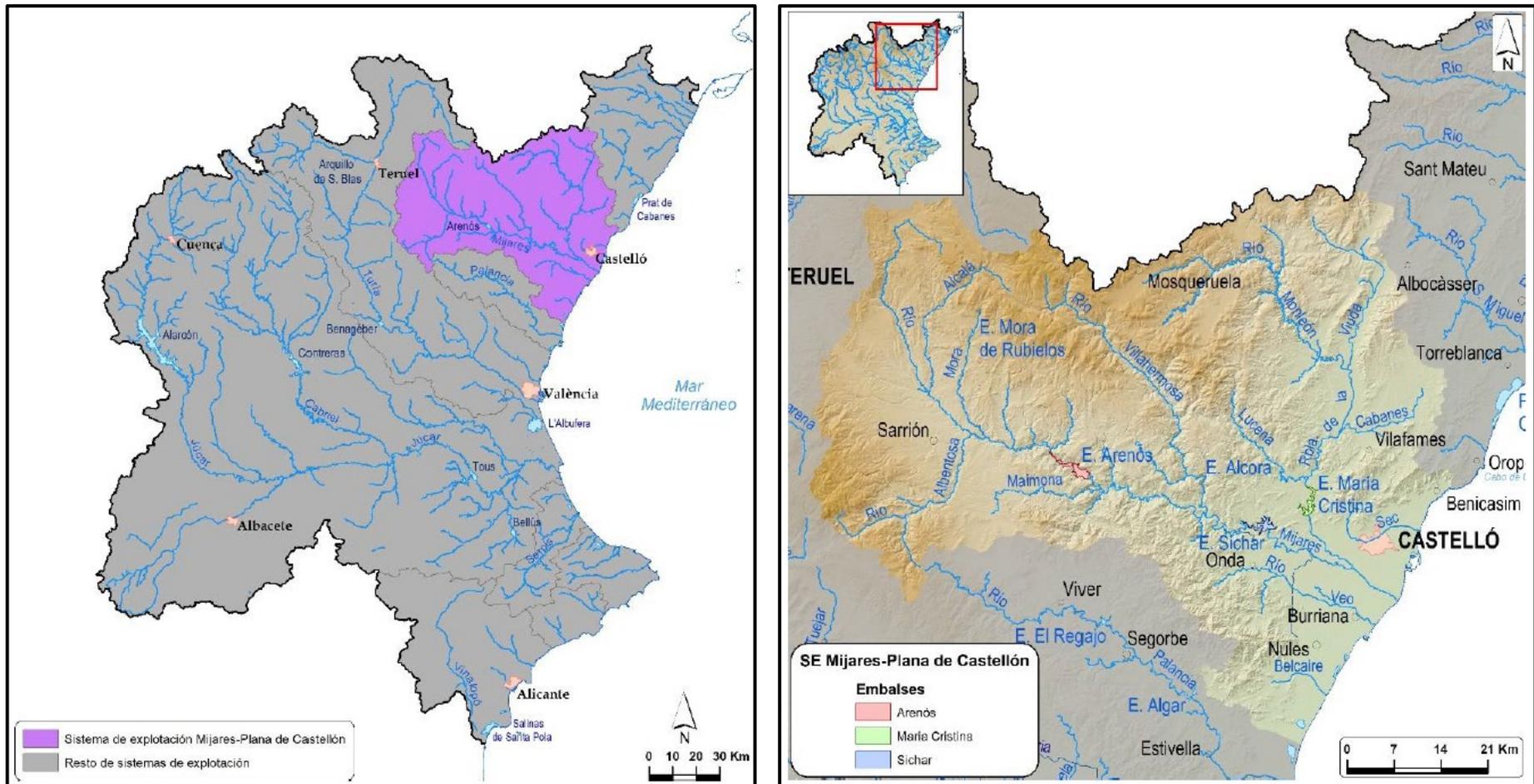
La Demarcación Hidrográfica del Júcar (DHJ) se ubica en la vertiente oriental de la península Ibérica en el ámbito de cinco Comunidades Autónomas (Cataluña, Aragón, Castilla – La Mancha, Comunidad Valenciana y Región Murcia), abarcando una superficie de 42756.41 km<sup>2</sup>. En la Tabla 1 se puede observar que casi la mitad de la extensión de la demarcación está dentro del ámbito de la Comunidad Valenciana, seguido de las comunidades autónomas de Castilla – La Mancha y Aragón.

Comunidad Autónoma	Demarcación Hidrográfica del Júcar	
	Área en la C.A. (km <sup>2</sup> )	Porcentaje en la C.A. (%)
Cataluña	87.99	0.2%
Aragón	5 373.81	12.6%
Castilla - La Mancha	16 110.56	37.7%
Comunidad Valenciana	21 120.04	49.4%
Región de Murcia	64.01	0.1%
<b>Total</b>	<b>42 756.41</b>	<b>100%</b>

**Tabla 1.** Superficie de la Demarcación Hidrográfica del Júcar por comunidad autónoma.

Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022.

En cuanto a los límites administrativos, la DHJ se encuentra geográficamente delimitada por la demarcación del Ebro al norte, la del Segura al sur, las demarcaciones del Tajo, Guadiana y Guadalquivir al oeste, y el mar Mediterráneo al este. En el Real Decreto 125/2007 y posteriores modificaciones se fija el ámbito territorial de las demarcaciones hidrográficas (Ministerio de Medio Ambiente, 2007).



**Figura 1.** Demarcación Hidrográfica del Júcar (a) y sistema de explotación Mijares – Plana de Castellón en la DHJ (b).

Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022.

La DHJ abarca una extensa cuenca drenada por el río Júcar, sus afluentes y el sistema de embalses. Además, en conjunto con los ríos Turia y Mijares, los tres ríos aportan alrededor del 65% del caudal medio de la región (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022). Es por ello que estos ríos tienen una gran importancia en el suministro de agua.

### 3.1.2. Sistema de explotación Mijares – Plana de Castellón

El sistema de explotación Mijares – Plana de Castellón cuenta con uno de los ríos de mayor importancia mencionados anteriormente, el río Mijares. El sistema cuenta con una superficie total de 4 818.78 km<sup>2</sup> (excluyendo las aguas costeras) y con importantes infraestructuras de regulación como son los embalses de Arenós, Sicha y María Cristina (Figura 1b). Además, se cuenta con la Balsa de Belcaire que actualmente cumple la función de inyectar los recursos superficiales del río Belcaire en el acuífero de Azuébar – Vall d’Uixó (García et al., 2022) y, por este motivo fue incluido en la simulación del presente trabajo.

Asimismo, en el sistema se cuenta con otros embalses como Alcora, Ribesalbes, Vallat, Cirat y Onda, sin embargo, no han sido considerados en este trabajo, al igual que en el PHJ22/27. Estos embalses tienen una menor capacidad que varía entre 0.05 y 2.02 hm<sup>3</sup> (Andreu, 2012), y no desempeñan un papel significativo en la regulación del sistema.

Dentro del sistema de explotación se han definido 52 masas de agua superficial, con una longitud total de 782 km. Asimismo, se definieron 14 cuerpos de agua subterránea integrados total o parcialmente al sistema, entre las que destacan por su extensión o volumen de extracción, las masas Javalambre Oriental, Mosqueruela, Maestrazgo Occidental, Lucena-l’Alcora, Onda–Espadán, Plana de Castellón, y Azuébar-Vall d’Uixó. En la Tabla 2 se presenta el recurso disponible, las restricciones totales por efecto ambiental y el recurso disponible de dichos cuerpos.

En relación con las Unidades de Demandas Urbanas (UDU), existen 11 UDU entre las que destacan las UDU Abastecimiento de la Plana de Castelló, Abastecimiento de Almassora, Abastecimiento de Castellón de la Plana y Abastecimiento del Consorcio de Aguas de la Plana.

Masa de agua subterránea		Recurso renovable (hm <sup>3</sup> /año)	Total restricciones (hm <sup>3</sup> /año)	Recurso disponible (hm <sup>3</sup> /año)
080-103	Javalambre Oriental	82.9	54.1	28.8
080-104	Mosqueruela	7.3	4.3	3
080-111	Lucena - Alcora	75.6	42.1	33.5
080-126	Onda - Espadán	26.5	13.4	12.8
080-127	Plana de Castellón	139.7	48.4	91.3
080-130	Azuébar - Vall d'Uixó	7.9	2.3	5.6
080-191	Maestrazgo Occidental	29.3	3.4	26

**Tabla 2.** Recurso renovable, total de restricciones y recurso disponible (hm<sup>3</sup>/año) de los acuíferos de mayor relevancia en la zona de estudio.

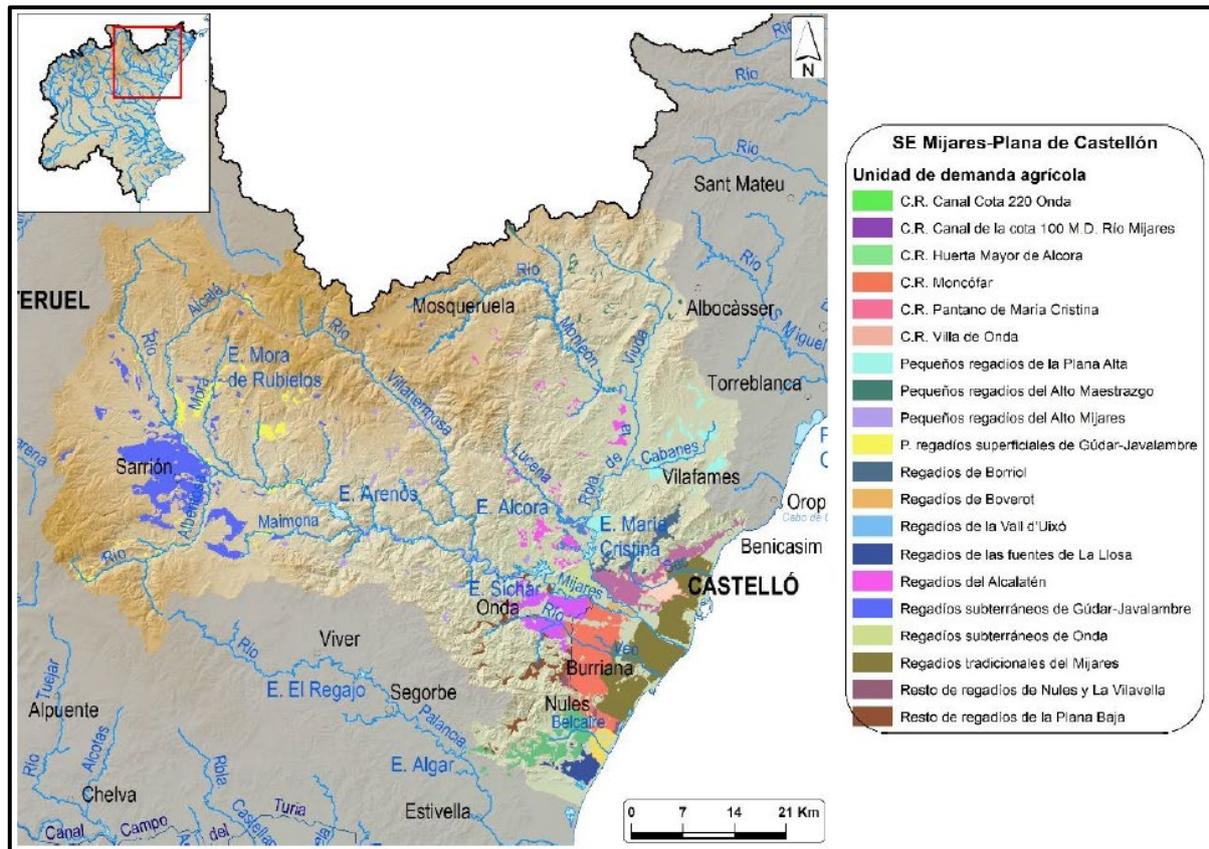
Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022.

En cuanto a las Unidades de Demandas Agrícola (UDA), se han definido en total 20 UDA. Existe una UDA adicional que se encuentra entre este sistema y el sistema Palancia – Los Valles, el cual se trata de los regadíos de fuente de Quart, sin embargo, es asignada al último sistema mencionado. Las principales zonas de regadío en la zona de estudio son las siguientes:

- Riegos tradicionales del Mijares: se riega con recursos superficiales del río Mijares y de recursos subterráneos en épocas de escasez hídrica mediante pozos de sequía, siendo 23 pozos en total. El ámbito incluye regadíos históricos en las tierras de Castellón de la Plana, Vila-real, Borriana, Almassora y Nules-Mascarell. Actualmente, en la mayor parte de su superficie cuentan con modernos sistemas de riego por goteo gracias al esfuerzo inversor de los usuarios.
- Riegos pantano de María Cristina: se riega principalmente con recursos superficiales del río Mijares a través del canal de enlace que parte del denominado tramo común y en menor medida de recursos subterráneos. Originalmente dependían de los recursos del embalse de María Cristina. Esta UDA fue desarrollada a principios del siglo XX.
- Riegos canal de la Cota 100: se riega con recursos superficiales del río Mijares a través del tramo común y con recursos subterráneos. Esta UDA existe desde mediados del siglo XX y abarca parte de los términos municipales de Vila-real, Betxí, Onda, Alquerías del Niño Perdido, Nules y Vilavella.
- Riegos del canal de la Cota 220: se riega principalmente con recursos superficiales del río Mijares y recursos subterráneos. Esta UDA se desarrolló en el último tercio del siglo XX y en los términos de Onda y Betxí.

- Regadíos de la Vall d’Uixó: se riegan principalmente con recursos subterráneos y una parte con recursos superficiales que tienen su origen en el manantial San José.
- Regadíos subterráneos de Moncófar: se riega fundamentalmente con recursos subterráneos.

En la Figura 2 se puede apreciar la distribución de las 20 UDA identificadas en el sistema de explotación.



**Figura 2.** UDA del sistema de explotación Mijares – Plana de Castellón.

Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022.

En relación con las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR), se identificaron 78 EDAR entre las que destacan, por el volumen tratado, las de Castellón de la Plana, Burriana, Onda-Betxí-Vila-real-Alquerías, Almassora, Vall d’Uixó, Moncófar y Benicàssim. En la Tabla 3 se puede apreciar los volúmenes depurados en situación actual.

EDAR	Volumen depurado en situación actual (hm <sup>3</sup> /año)
Almassora	2.5
Vall d'Uixó	1.5
Castellón de la Plana	13.9
Onda-Betxi-Vila-real-Alquerías	3.3
Borriana	4.6
Benicàssim	2.2
Moncófar	1.5
<b>Total</b>	<b>29.5</b>

**Tabla 3.** Volumen depurado (hm<sup>3</sup>/año) en situación actual de las EDAR de mayor relevancia en la zona de estudio.

Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022.

De las EDAR mencionadas solo la EDAR Vall d'Uixó regenera los recursos vertidos para el suministro en la UDA Vall d'Uixó. El volumen reutilizado es igual al volumen depurado, es decir, regenera todo el recurso disponible. En situación actual, los volúmenes máximos disponibles para reutilización se encuentran limitados por el PHJ, por lo que no se está explotando al máximo la capacidad de dichos recursos adicionales. Se debe tener en cuenta que no será posible aprovechar el volumen máximo establecido a suministrar, a menos que se cuente con infraestructuras que almacenen los recursos regenerados no utilizados en los meses de menor demanda hídrica.

Dado que el PHJ22/27 ha sido aprobado por el Real Decreto 35/2023, los caudales ecológicos propuestos entran en vigor, es por ello que el presente trabajo se realiza sobre éstos. Se fijaron caudales ecológicos en 33 masas de agua superficial de un total de 47 masas definidas según la categoría de río (Figura 3). Las fijaciones se dan principalmente en el río Mijares y sus afluentes; en el resto de las masas no se han fijado caudales ecológicos, debido a que corresponden a masas clasificadas como efímeras. Cabe indicar que en el PES también se presentaron caudales ecológicos para los mismos tramos del río Mijares, sin embargo, no fueron considerados por no estar en vigor. Es necesario una sincronización entre ambos instrumentos de planificación para evitar errores en el desarrollo de los modelos de gestión.

En el ámbito del sistema de explotación se encuentra construida y operativa la IDAM de Moncófar con una capacidad máxima de producción anual de 10.9 hm<sup>3</sup> (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022).



Por otro lado, en el sistema se ha identificado una Unidad de Demanda Termoeléctrica (UDT) que corresponde a la central térmica de Castellón ubicado en la zona costera de la localidad de Castellón. Esta UDT tiene una demanda anual de  $0.6 \text{ hm}^3$ .

### 3.1.3. Cuencas hidrográficas del sistema de explotación

En el sistema de explotación Mijares – Plana de Castellón el río Mijares es el de mayor relevancia por su aporte y extensión. De las tres principales cuencas en la DHJ, la cuenca hidrográfica del río Mijares es la de menor extensión superficial con  $4818.78 \text{ km}^2$  (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022).

La cuenca hidrográfica del río Mijares se ubica en la vertiente oriental de la península Ibérica con una longitud de 156 km. Recibe afluentes de diversos ríos, entre los que destacan los ríos Villahermosa y la Rambla de la Viuda en la parte media y baja de la cuenca, respectivamente (Paredes et al., 2008). Históricamente ha sido utilizado para la agricultura y para la generación de energía hidroeléctrica. Su caudal varía considerablemente a lo largo del año en función de las precipitaciones y del régimen de regulación del embalse de Arenós. Además, el sistema de embalses permite controlar las inundaciones y mejorar la seguridad de las comunidades cercanas en caso de eventos climáticos extremos.

Otro de los ríos de mayor relevancia en el sistema de explotación es el río Belcaire. La cuenca hidrográfica del río Belcaire abarca una superficie de  $103.4 \text{ km}^2$  y tiene una longitud total de 26 km que desemboca en el mar mediterráneo (Andreu, 2012). Se caracteriza por tener un régimen muy irregular con avenidas torrenciales en épocas de lluvias intensas y caudales reducidos en épocas de sequía.

También existen otros cauces menores que desembocan en el mar mediterráneo como el río Veo y el río Seco. La cuenca hidrográfica del río Veo abarca una superficie de  $238.7 \text{ km}^2$  y una longitud total de 42 km, mientras que el río Seco tiene una superficie  $94.3 \text{ km}^2$  y una longitud de 26 km (Andreu, 2012). Ambos son considerados como ríos efímeros, pues tienen caudales irregulares que varían según la estación del año y las precipitaciones.

### 3.2. Problemática

El sistema de explotación del Mijares – Plana de Castellón ofrece un ámbito de gran interés para el estudio de la planificación y gestión sostenible de los recursos hídricos por los diversos problemas que afronta.

Uno de los problemas que afronta el sistema es la sobreexplotación del acuífero en la zona baja de la Plana de Castellón que provoca intrusión salina en diferentes pozos del acuífero costero (Andreu, 2012), especialmente en épocas de sequía cuando se produce una mayor explotación (Paredes et al., 2008). En los años más húmedos no se genera este problema debido a que se suministra a las demandas principalmente los recursos superficiales.

La sobreexplotación provoca una importante disminución en los niveles piezométricos, lo que genera, en algunos casos, que se invierta el sentido del flujo en la relación río-acuífero dando paso a la entrada de aguas salinas en los acuíferos costeros. La contaminación del acuífero genera que el volumen suministrado a las demandas, tanto urbanas como agrarias (UDA Vall d’Uixó y Moncófar), sea de baja calidad por el exceso de sales.

En respuesta a ello, la Comunidad General de Regantes (CGR) de la UDA Vall d’Uixó solicitó el cambio de uso de la Balsa de Belcaire a riego sin perder su finalidad última que es la recarga del acuífero. Con esto se buscaría eliminar o minimizar los bombeos del acuífero de la UDA Vall d’Uixó.

En referencia a ello, el 3 de noviembre de 2022 se realizó un seminario sobre Recarga Artificial de Acuíferos en la DHJ, enmarcado en el proyecto de investigación internacional "Adaptive agreements on benefits sharing for managed aquifer recharge in the Mediterranean region" (AGREEMAR), en donde se informó que en el Programa de Puesta en Carga de la Balsa de Belcaire en el año 2020 inició la última etapa, la cual corresponde a la de vaciado. Dado que a la fecha del seminario se mantuvo en pendiente de autorización para la recarga del acuífero mediante pozos, el CGR de Vall d’Uixó solicitó la autorización provisional para el suministro de agua de la Balsa durante esta etapa para reducir los bombeos en el acuífero. A la fecha, la Confederación Hidrográfica del Júcar emitió una resolución autorizante el uso provisional a la CGR hasta 12 meses o agotamiento del volumen disponible, a la espera de la autorización para la recarga artificial.



Otro problema que afronta el sistema es el conflicto existente en los diferentes usuarios por el reparto del agua (Andreu, 2012). Si no se realiza una adecuada gestión de los recursos se presentarán problemas de escasez crónica en las demandas. Es por ello que se construyeron algunas infraestructuras hidráulicas, tales como la desaladora de Moncófár o la Balsa de Belcaire (Paredes et al., 2008).

En resumen, es necesario abordar estas cuestiones de manera efectiva para garantizar la disponibilidad de los recursos hídricos a largo plazo y asegurar un equilibrio sostenible entre las diferentes demandas en el sistema.

## 4. Metodología

### 4.1. Recopilación y análisis de la información

#### 4.1.1. Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar 2022-2027

Un plan hidrológico de cuenca es un documento elaborado por un organismo de cuenca que proporciona las pautas a seguir para la gestión sostenible del agua y las medidas necesarias para garantizar el buen estado de las masas de agua en cada demarcación. Los planes hidrológicos son aprobados por el Consejo de Ministros del Gobierno de España.

Los organismos de cuenca son definidos como Confederaciones Hidrográficas, adscritas al Ministerio para la Transición Ecológica, y están a cargo de la gestión de una determinada demarcación hidrográfica. La demarcación hidrográfica es un área terrestre y marítima que consta de una o más cuencas hidrográficas vecinas y las aguas costeras, subterráneas y de transición asociadas.

El Plan Hidrológico de tercer ciclo (2022-2027) en la Demarcación Hidrográfica del Júcar (DHJ) fue aprobado el 24 de enero de 2023 por el Real Decreto 35/2023 (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023a).

Además, en el PHJ22/27 se evalúa el efecto conjunto del nuevo régimen de caudales ecológicos, el incremento de la demanda y las medidas previstas (infraestructuras para la reutilización de las EDAR, derivación de los posibles excedentes invernales del río Mijares a la zona del interfluvio Mijares – Palancia, desalinizadora de Moncófar). Si bien en las medidas previstas no se menciona sobre los recursos del embalse de María Cristina ni en la situación actual del sistema sí son considerados en un escenario previo al análisis de las medidas en su conjunto, es por ello, que en el presente trabajo se consideró esta acción como una medida adicional.

De los Anejos del PHJ22/27 se obtuvo la siguiente información de mayor relevancia referida al sistema de explotación:

- Anejo 2 “Inventario de recursos hídricos”: presenta las series restituidas a régimen natural en el punto de control aguas debajo de los embalses de Arenós, Sichar y María Cristina que se tomaron como base para las principales aportaciones del sistema.

- Anejo 3 “Usos y demandas de agua”: se detallan todos los usos y demandas en el sistema de explotación, de los cuales se consideró para el modelo las demandas agrícolas e hidroeléctricas mensuales en situación actual y con asignaciones futuras.
- Anejo 5 “Régimen de caudales ecológicos”: incluye los caudales ecológicos mensuales en todos los tramos de río en el sistema de explotación. Dado que el PHJ22/27 se encuentra aprobado se trabajó sobre los caudales ecológicos propuestos, es decir, el modelo inicial no incluye los caudales ecológicos previos a la aprobación del plan.
- Anejo 6 “Sistemas de explotación y balances”: se obtuvo la mayor parte de la información base de cada elemento del modelo para simular la gestión del sistema de explotación en situación actual. El presente trabajo se realiza sobre este modelo calibrado para realizar las evaluaciones posteriores.

#### 4.1.2. Plan Especial de Sequía 2018

Un Plan Especial de Sequía (PES) es una herramienta para gestionar el riesgo de sequía en el ámbito de las demarcaciones hidrográficas. Su objetivo general es minimizar los aspectos ambientales, económicos y sociales de las eventuales situaciones de sequía. Los planes son elaborados por la Confederación Hidrográfica correspondiente y, posteriormente, aprobados por el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico.

Dado que se busca una gestión eficiente y sostenible del agua en situación de sequía para lograrlo se definen mecanismos para la prevención y detección de situaciones de sequía, se fijan umbrales para determinar la gravedad y se definen diversas medidas.

Es importante destacar que en el PES se diferencian claramente las situaciones de sequía y escasez, siendo analizadas por Unidades Territoriales de sequía prolongada (UTS) y de escasez coyuntural (UTE), respectivamente. La sequía es entendida como un fenómeno natural resultante de la reducción de las precipitaciones que da lugar a un descenso significativo de los recursos hídricos disponibles y se produce con independencia de la acción antrópica; mientras que la escasez es entendida como la problemática temporal de una determinada zona para la atención de las demandas establecidas para los diferentes usos socioeconómicos, y por tanto dependiente de la intervención humana con su utilización del recurso (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2018).

El Plan Especial de Sequía 2018 de la Demarcación Hidrográfica del Júcar (DHJ) fue aprobado el 26 de diciembre de 2018 mediante la Orden TEC/1399/2018. La información más relevante es la referente a las UTE, dado que al estar muy relacionadas con las demandas atendidas en los diferentes sistemas de explotación son de vital importancia para el desarrollo de los planes hidrológicos.

El indicador de una UTE se define por 3 umbrales (valores de 0.5, 0.3 y 0.15) que marcan los límites entre las cuatro fases establecidas de escasez: normalidad (ausencia de escasez), prealerta (escasez moderada), alerta (escasez severa) y emergencia (escasez grave).

En el caso particular del sistema de explotación del Mijares – Plana de Castellón, el indicador UTE se obtiene en el PES en base a distintos indicadores para determinar el volumen de recursos hídricos disponibles, tales como las aportaciones a los embalses, la evolución del nivel piezométrico en los principales acuíferos y el volumen de recursos almacenados en el sistema de embalses.

#### 4.2. Elección del modelo de gestión

La elección del modelo de gestión es un aspecto crítico para lograr una adecuada representación del sistema de explotación y poder analizar diferentes escenarios en la gestión de los recursos hídricos. En este caso, se escogió trabajar con el software AQUATOOL, específicamente con el módulo SIMGES, debido a que es el modelo de simulación de la gestión utilizado para la elaboración de todos los planes hidrológicos de cuenca en España, y se ha probado su robustez y validez para resolver problemas como el abordado en este Trabajo Fin de Máster.

AQUATOOL es un entorno de desarrollo de sistemas de soporte a la decisión (SDD) para la planificación y gestión que incorpora distintos módulos para el análisis de los recursos hídricos, las cuales permiten analizar la gestión en las cuencas hidrográficas y distintas opciones de uso conjunto como los bombeos, recarga de acuíferos, reutilización de agua depurada, desalinización, etc.

Este software ha sido ampliamente utilizado en la Comunidad Valenciana y otras zonas geográficas del país. A nivel internacional también ha sido utilizado, o se está utilizando, por

ejemplo, en los siguientes países: Italia, Argelia, Chipre, Turquía, Marruecos, Brasil, Perú, Ecuador, Uruguay y México (Iagua, 2019).

El módulo SIMGES, en concreto, permite modelar a escala mensual el uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas, para lo cual dispone de distintas formas de representar a los acuíferos. Para ello se construye un esquema (definido por el usuario) compuesta por arcos y nudos, donde los nudos representan confluencias o divergencias de tramos fluviales, embalses, demandas, etc.; mientras que los arcos representan cualquier flujo de agua, sea natural o artificial. La combinación de ambos elementos permite representar centrales hidroeléctricas, retornos al sistema, etc. (Paredes et al., 2008).

SIMGES realiza la asignación de los recursos a los distintos usos en base a un orden de prioridad entre los elementos, el cual es establecido por el usuario. Los usos que tienen una prioridad igual constituyen un grupo isoprioritario, lo que implica que si en un mes el agua no satisface las demandas de los elementos de ese grupo el déficit se reparte entre ellos proporcionalmente al requerimiento (Collazos, 2004).

En cuanto a los escenarios de escasez, el módulo cuenta con un mecanismo para reducir la asignación en periodos de escasez, los cuales son los indicadores de alarma o indicadores de emergencia. Estos indicadores son definidos por el usuario y relacionan el volumen almacenado en uno o varios embalses con un porcentaje del volumen requerido por los usos, es decir, el suministro a la demanda estará relacionado según el volumen embalsado y/o según los valores de las aportaciones (Collazos, 2004).

### 4.3. Definición de escenarios

En primer lugar, en el apartado “5. Análisis de la situación actual del sistema”, se consideró un “Escenario PHJ” que incluye el modelo de gestión de la zona de estudio en situación actual. Este modelo se basó en gran medida sobre la información proporcionada en el PHJ22/27 para obtener un modelo calibrado. La topología del modelo desarrollado es similar con la del PHJ22/27, sin embargo, presenta algunas diferencias que serán de gran importancia para los siguientes escenarios. Cabe indicar que la situación actual hace referencia al momento de la aprobación del Real Decreto 35/2023 y previo a la ejecución de las diversas medidas propuestas en el PHJ22/27.

Para el análisis de las garantías en las UDA se utilizó el criterio UTAH-DWR (Estrada, 1991) con los umbrales de satisfacción del Instrumento de Planificación Hidrológica 2008 (IPH). El criterio consiste en considerar un fallo cuando se produce una de las tres circunstancias:

- El déficit en un año supera el 50% de la correspondiente demanda anual.
- El déficit en dos años consecutivos supera el 75% de la demanda anual.
- El déficit en diez años consecutivos supera el 100% de la demanda anual.

Seguido a ello, en el apartado “6. Análisis de la situación actual con restricciones del Plan Especial de Sequía”, se consideró el “Escenario Base” que, sobre el modelo de gestión calibrado, se incluyen las reglas de operación derivadas del PES para la reducción de los suministros (o aumento en el caso de los pozos de sequía) y las reglas de operación para las reducciones de los caudales ecológicos en sequía prolongada. Dado que el PES es de obligatorio cumplimiento en la normativa española se consideró este escenario como la base para los análisis de las diferentes medidas propuestas en el PHJ22/27 que permitirán la gestión sostenible de los recursos hídricos en el sistema.

En el apartado “7.1. Efecto de las depuradoras” se consideró el “Escenario Base + Reutilización”, en el cual se implementó en el modelo base las medidas de reutilización de agua regenerada procedente de las EDAR Castellón, Vall d’Uixó, Almassora, Borriana y Moncófar para el suministro de las demandas agrícolas.

En el apartado “7.2. Efecto de la desalinizadora” se consideró el “Escenario Base + Desalinización”, sobre el modelo base se implementa la medida de utilizar agua desalinizada procedente de la IDAM Moncófar para el suministro a la UDA Vall d’Uixó.

En el apartado “7.3. Efecto de la Balsa de Belcaire” se consideró el “Escenario Base + Balsa”, este modelo incluye la medida de utilizar la Balsa de Belcaire como una infraestructura de regulación que recibe recursos del río Belcaire y excedentes del río Mijares para el suministro a las UDA Vall d’Uixó y Moncófar, además de mantener la función de inyectar recursos en el acuífero de Azuébar – Vall d’Uixó.

En el apartado “7.4. Efecto del embalse de María Cristina” se consideró el “Escenario Base + MC”, el cual incluye en el modelo base el suministro a la UDA María Cristina con recursos disponibles del embalse de María Cristina.

Luego del análisis de cada medida por separado, en el apartado “8. Análisis de la situación actual con restricciones del PES y medidas propuestas” se trabajó el “Escenario Base + Medidas” que implementó en el modelo base todas las medidas propuestas en el PHJ22/27 y mencionadas anteriormente.

Finalmente, en el apartado “9. Análisis de las asignaciones futuras con las medidas propuestas y restricciones del PES” se consideró el “Escenario Asignaciones + Medidas” que modifica sobre el modelo anterior el aumento de las capacidades máximas de suministro y el aumento de las demandas agrícolas según las asignaciones futuras previstas en el PHJ22/27.

#### 4.4. Desarrollo del modelo conceptual de la gestión

El modelo conceptual de la gestión del sistema de explotación Mijares – Plana de Castellón abarca tanto el río Mijares como el interfluvio Mijares – Palancia. Este modelo se elaboró con el propósito de analizar y comprender los desafíos actuales en la gestión de los recursos hídricos, y así poder evaluar la efectividad de diferentes estrategias para abordarlos. Para ello, se integraron en el modelo datos de diversas fuentes que abarcan los usos, las demandas y la disponibilidad del agua, con el objetivo de brindar una visión completa y precisa del sistema hidrológico. El esquema topológico desarrollado (Figura 4) guarda similitud con el presentado en el PHJ22/27 para facilitar la comparación, la diferencia radica en unos tramos adicionales en las tomas superficiales.

##### 4.4.1. Aportaciones naturales

En el modelo se incluyeron cinco aportaciones naturales: tres que aportan directamente al río Mijares, una proveniente del río Belcaire y una proveniente del manantial San José.

Las ubicaciones de las aportaciones al río Mijares se diferencian claramente, pues alimentan en la parte alta, media y baja de la cuenca (Figura 5). La primera aportación “Ap. Arenós”, ubicada en la cabecera de cuenca, representa la totalidad del recurso que ingresa al embalse de Arenós con una media anual de 138.9 hm<sup>3</sup> para el periodo 1940-2018 (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022).

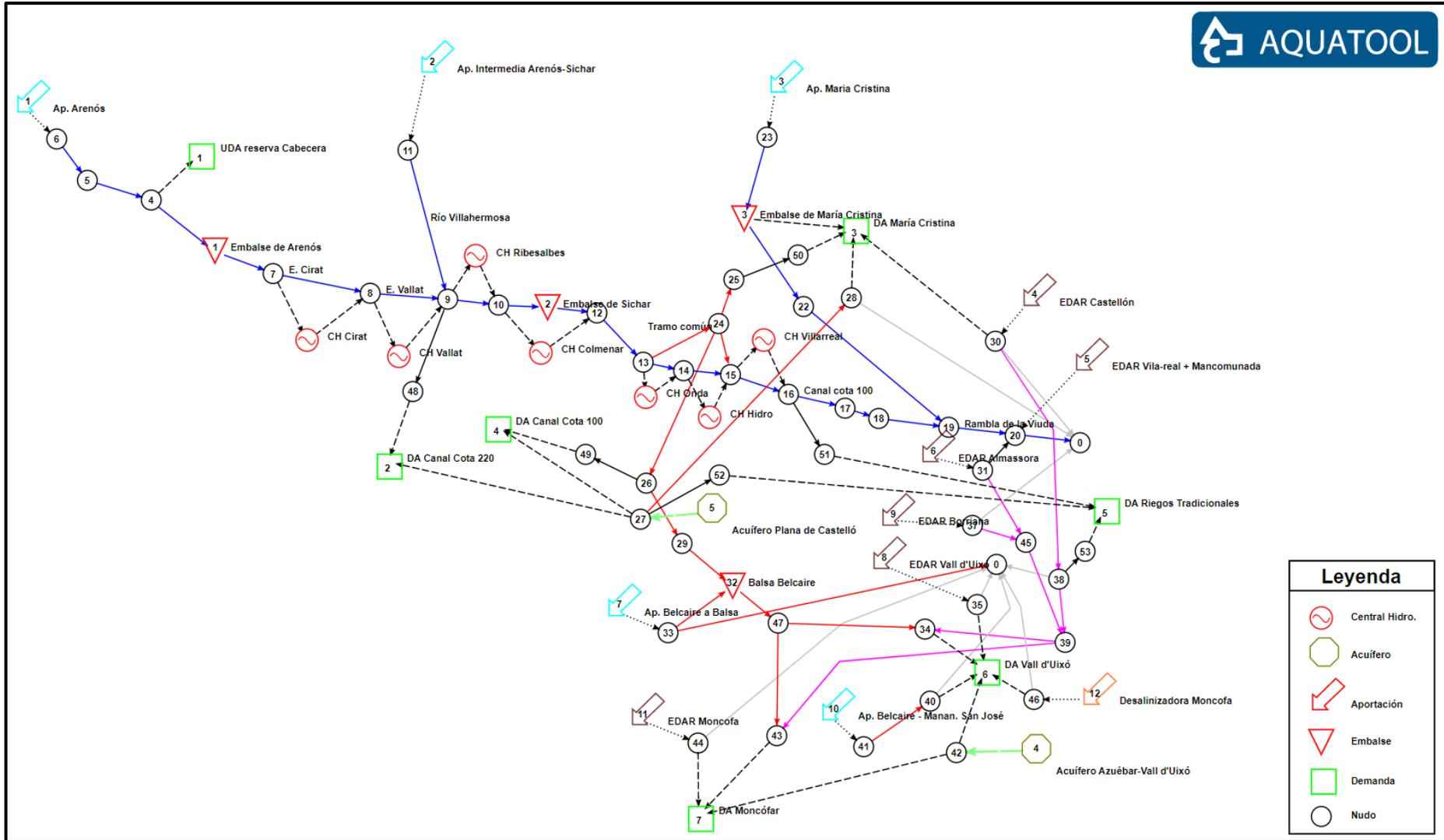
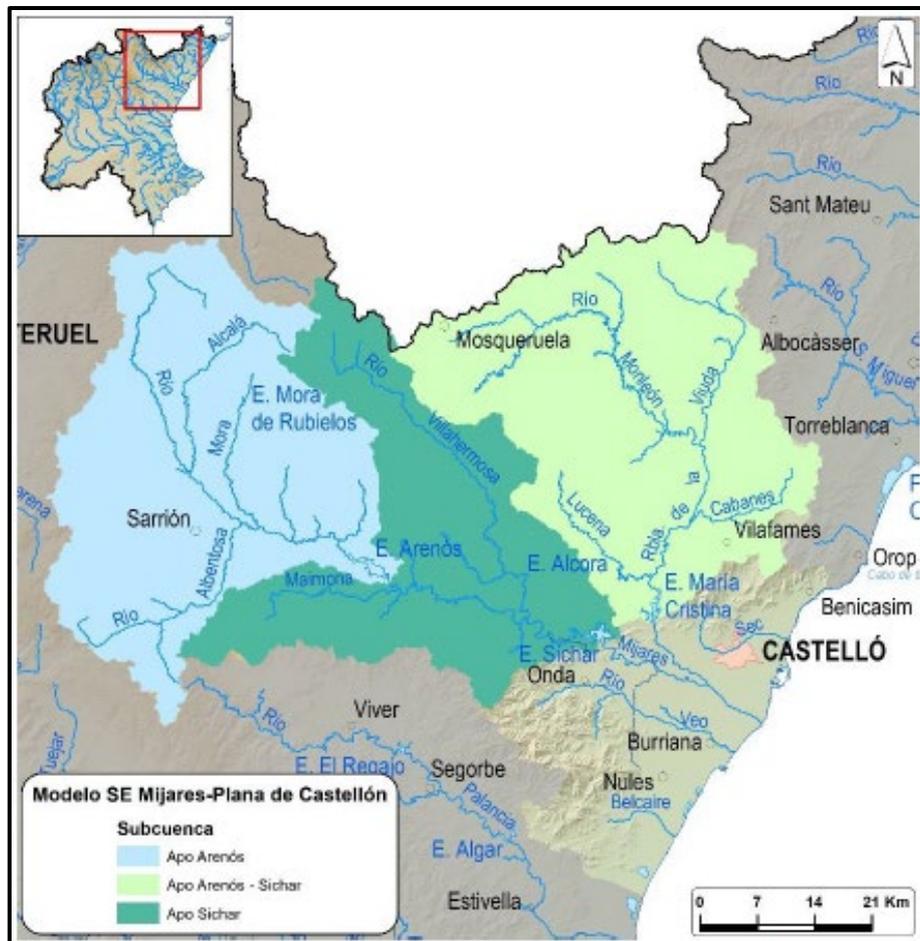


Figura 4. Esquema topológico desarrollado en SIMGES para la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

La segunda aportación “Ap. Intermedia Arenós – Sichar” representa los afluentes al río Mijares ubicados entre el embalse de Arenós y Sichar, como es el caso del río Villahermosa. Su valor medio anual es  $53.7 \text{ hm}^3$  para el mismo periodo (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022). La tercera aportación “Ap. María Cristina” representa el recurso que ingresa al embalse de María Cristina con una media anual de  $35.1 \text{ hm}^3$  para el periodo 1940-2012 (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2015), y a través de la Rambla de la Viuda alimenta al río Mijares en la parte baja de la cuenca. Cada una de las series mensuales obtenidas de los PHJ fueron calculadas por restitución a régimen natural y los datos faltantes se completaron con el modelo hidrológico PATRICAL.



**Figura 5.** Subcuencas de las aportaciones superficiales naturales consideradas en el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022.

En cuanto a los otros dos elementos aportación, ambos son obtenidos del río Belcaire. La primera aportación “Ap. Belcaire a Balsa” representa el recurso derivado del río Belcaire hacia la Balsa de Belcaire con la finalidad de infiltrarlo en el acuífero con una media anual de  $2.5 \text{ hm}^3$  durante periodo 1940-2012 (Torres, 2021). La quinta aportación “Ap. Belcaire – Manan.

San José” representa el recurso disponible del río Belcaire, con apoyo del recurso procedente del manantial de San José, para suministrar en la demanda agrícola de Vall d’Uixó con una media anual de  $1.1 \text{ hm}^3$  en el periodo 1940-2012 (Torres, 2021; Paredes y Solera, 2020).

Con la finalidad de evaluar la necesidad de trabajar con series de tiempo parciales o completas por la posible existencia del “efecto 80” evidenciado en otros sistemas de la Demarcación (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022), se realizaron pruebas de tendencia de Mann-Kendall para detectar tendencias en las series de tiempo y pruebas de Pettitt para identificar algún cambio en las tendencias de las series de tiempo independiente de que tengan o no una tendencia estadísticamente significativa.

Las pruebas fueron realizadas en las principales aportaciones del sistema, siendo Ap. Arenós y Ap. Intermedia Arenós – Sichar, por ser las de mayor relevancia en el modelo de gestión al contar con los mayores volúmenes anuales.

En los resultados de las pruebas de Mann-Kendall y Pettitt se obtuvo que ambas series de tiempo no tienen tendencias ni cambios estadísticamente significativos. Por esta razón, se decidió trabajar con las series de tiempo completas en el modelo. Dado que el “efecto 80” no es de gran impacto en las aportaciones, el trabajar con las series completas de tiempo nos representará una dinámica del sistema más precisa y detallada de las aportaciones, mejorando así la precisión del modelo.

#### 4.4.2. Aportaciones no naturales

Este tipo de aportaciones representa tanto los recursos hídricos obtenidos de las Estaciones Depuradoras de Aguas Residuales (EDAR) como los obtenidos por la desalinizadora propuesta.

En relación con las EDAR incluidas en el modelo se tienen las de Castellón, Vila-real + Mancomunada, Almassora, Borriana, Vall d’Uixó y Moncófar; con vertidos anuales de 13.9, 3.3, 2.5, 4.6, 1.5 y  $1.5 \text{ hm}^3$ , respectivamente (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022). Actualmente, solo la EDAR de Vall d’Uixó regenera un volumen total anual de  $1.5 \text{ hm}^3$  de agua depurada para ser reutilizada en el suministro de agua para la demanda agrícola de Vall d’Uixó.

Aportación no natural	Vertido anual (hm <sup>3</sup> )	Reutilización anual (hm <sup>3</sup> )	Modelo (hm <sup>3</sup> )
EDAR Moncófar	1.5	0.0	1.5
EDAR Almassora	2.5	0.0	2.5
EDAR Borriana	4.6	0.0	4.6
EDAR Castellón	13.9	0.0	13.9
EDAR Vila-real	3.3	0.0	3.3
EDAR Vall d'Uixó	1.5	1.5	1.5

**Tabla 4.** Volumen anual depurado en situación actual, reutilizado e incluido en el modelo de gestión en hm<sup>3</sup>.

Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la desalinizadora incluida en el modelo corresponde a la desalinizadora de Moncófar que proyecta suministrar un volumen anual para la demanda agrícola de Vall d'Uixó, sin embargo, como a la fecha no cumple esta función no se la consideró en el modelo en primera instancia. Más adelante se analizará el efecto de la inclusión de la desalinizadora en la planificación y gestión del sistema de recursos hídricos.

#### 4.4.3. Embalses

Según como fue mencionado en el apartado "4.4.1. Aportaciones naturales" el modelo cuenta con tres embalses principales: Arenós, Sichar y María Cristina. Con información del PHJ22/27 se configuraron los volúmenes máximos por resguardo frente eventos extremos como avenidas y los volúmenes mínimos considerando criterios ambientales.

Embalse	Capacidad máxima (hm <sup>3</sup> )	Volumen mínimo (hm <sup>3</sup> )
Arenós	65	1.4
Sichar	41.5	2.5
María Cristina	17	0.1

**Tabla 5.** Capacidad máxima y volumen mínimo por cada embalse en hm<sup>3</sup>.

Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022.

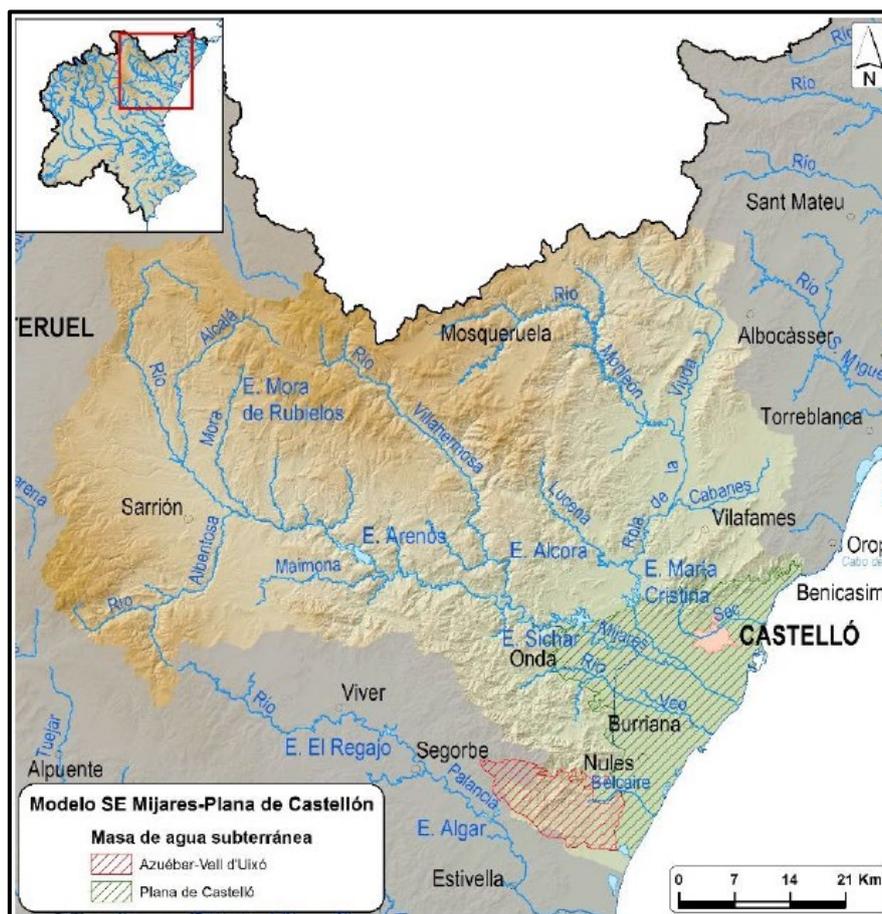
En cuanto a los datos restantes como el volumen objetivo, los coeficientes de infiltración, el caudal máximo de sueltas (hm<sup>3</sup>/mes), la relación cota (m) – superficie (ha) – volumen (hm<sup>3</sup>) y la tasa de evaporación se obtuvieron del Documento Técnico de Referencia (DTR) del sistema de explotación Mijares (Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos, 2012).

También se estableció un orden de preferencia para el almacenamiento de agua en el embalse de Arenós sobre los embalses de Sichar y María Cristina. La finalidad de ello fue que primero se desembalsen éstos últimos y luego el embalse ubicado aguas arriba de todos.

Asimismo, en la construcción del modelo se incluyó a la Balsa de Belcaire como un elemento embalse con una capacidad máxima de 2 hm<sup>3</sup>. La información complementaria como el caudal máximo de sueltas (hm<sup>3</sup>/mes), la relación cota – superficie – volumen y la tasa de evaporación se obtuvieron del DTR mencionado anteriormente (Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos, 2012).

#### 4.4.4. Acuíferos

El modelo de gestión cuenta con dos acuíferos: Plana de Castellón y Azuébar – Vall d’Uixó (Figura 6). Ambos cuerpos de agua fueron modelados como acuíferos de tipo depósito, esto significa que se tratan de acuíferos que no están conectados hidráulicamente con el sistema superficial y se comportan como depósitos aislados (Andreu et al., 2017). El contar con estos dos elementos es de vital importancia para el presente trabajo porque permitió identificar el impacto de las medidas evaluadas en cada uno de los acuíferos de forma separada.



**Figura 6.** Masas de agua subterránea consideradas en el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022.

El acuífero de la Plana de Castellón recibe filtraciones de dos tramos del río Mijares: uno ubicado aguas abajo de la derivación del tramo común y el otro ubicados antes de la desembocadura. En la Figura 4 se pueden identificar como los tramos entre los nudos 14-15 y 19-20, respectivamente. Las pérdidas por infiltración se calculan como  $P = 0.5 + 0.075 * Q$ , donde P son las pérdidas y Q el caudal circulante. Además de ello, también recibe las filtraciones de los embalses de Schar y María Cristina, y de los regadíos ubicados en el ámbito del acuífero. Por otro lado, los recursos de esta masa de agua subterránea son utilizados para el suministro a las demandas agrícolas de los riegos mixtos y demandas urbanas.

En cuanto al acuífero de Azuébar – Vall d’Uixó, recibe la recarga inducida de los recursos del río Belcaire a través de la Balsa de Belcaire. En la topología de la Figura 4 se representa con el tramo 33-0, donde las pérdidas en el tramo son iguales al caudal circulante ( $P = Q$ ). Los recursos de esta masa de agua se utilizan para el suministro subterráneo de las demandas agrícolas de Vall d’Uixó y Moncófar. Al igual que el acuífero de la Plana de Castellón, este acuífero también recibe las infiltraciones de los regadíos ubicados en su ámbito.

#### 4.4.5. Conducciones

Las conducciones del modelo fueron clasificadas bajo tres categorías según su color: azul, rojo y turquesa. Cada una de ellas representa un tipo de tramo en específico donde se transporta un tipo determinado de agua.

Las conducciones azules representan tramos naturales del río, como el caso del río Mijares y sus afluentes (río Villahermosa y Rambla de la Viuda). Las conducciones rojas representan tramos artificiales que no siguen el curso de un río; son tramos construidos o con proyección a construir para derivar el recurso de un río hacia un lugar en específico. Por último, las conducciones turquesas son tramos ficticios a la fecha con proyección a conducir, a través de ellas, agua regenerada proveniente de las EDAR.

Paralelamente se tiene otra clasificación de las conducciones de acuerdo al tipo de conducción propio del programa AQUATOOL (C1, C2, C3, C4 y C5). En el modelo solo se utilizaron las conducciones tipo 1 (C1) y tipo 2 (C2). La primera se trata de una conducción sin ninguna característica en especial, mientras que la segunda considera las pérdidas por filtración (Solera et al., 2015).



En general las conducciones son del tipo 1, a excepción de los tramos entre los nudos 14-15, 19-20 y 33-0, los cuales son conducciones del tipo 2. Tal y como fue mencionado en el apartado “4.4.4. Acuífero” estos mismos tramos son los que infiltran parte del recurso circulante a las masas de agua subterráneas. Las tasas de infiltración de los tres tramos se obtuvieron del PHJ22/27.

#### 4.4.6. Caudales ecológicos

En el PHJ22/27 se establecen caudales ecológicos en todos los tramos del río Mijares entre el embalse de Arenós y la desembocadura, esto no incluye a sus afluentes como el río Villahermosa o la Rambla de la Viuda. En el caso de este último afluente, pese a que tiene una aportación considerable regulada por el embalse de María Cristina, se considera un río efímero. Con el Real Decreto 35/2023 de fecha 24 de enero de 2023 se aprueba el PHJ22/27 (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023a), que establece estos caudales como de obligatorio cumplimiento. Por esta razón, el presente trabajo las incorpora desde el principio.

Masa de agua	Caudal ecológico mensual (hm <sup>3</sup> )											
	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
10-06a Río Mijares: embalse de Arenós - embalse de Cirat	1.3	1.2	1.4	1.4	1.5	1.6	1.7	1.6	1.4	1.3	1.3	1.2
10-06 Río Mijares: embalse de Cirat - embalse de Vallat	2.1	2.1	2.4	2.4	2.5	2.7	2.9	2.7	2.3	2.1	2.1	2.1
10-07 Río Mijares: embalse de Vallat - embalse de Ribesalbes	2.3	2.3	2.6	2.6	2.4	2.6	2.5	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
10-08 Río Mijares: embalse de Ribesalbes - embalse de Sichar	2.3	2.3	2.7	2.7	2.4	2.7	2.6	2.3	2.3	2.3	2.3	2.3
10-10a Río Mijares: embalse de Sichar - toma del tramo común	3.21	3.11	3.64	3.64	3.35	3.64	3.53	3.21	3.11	3.21	3.21	3.11
10-10b Río Mijares: toma del tramo común - canal cota 100	2.68	2.59	3.03	3.03	2.78	3.03	2.93	2.68	2.59	2.68	2.68	2.59
10-11a Río Mijares: canal cota 100 - azud Vila-real	0.8	0.78	0.91	0.91	0.84	0.91	0.88	0.8	0.78	0.8	0.8	0.78
10-11b Río Mijares: azud Vila-real - rambla de la Viuda	0.8	0.78	0.91	0.91	0.84	0.91	0.88	0.8	0.78	0.8	0.8	0.78
10-12b Río Mijares: rambla de la Viuda - delta del Mijares	0.27	0.26	0.29	0.29	0.27	0.29	0.29	0.27	0.26	0.27	0.27	0.26
10-13a Río Mijares: delta del Mijares - mar	0.27	0.26	0.29	0.29	0.27	0.29	0.29	0.27	0.26	0.27	0.27	0.26

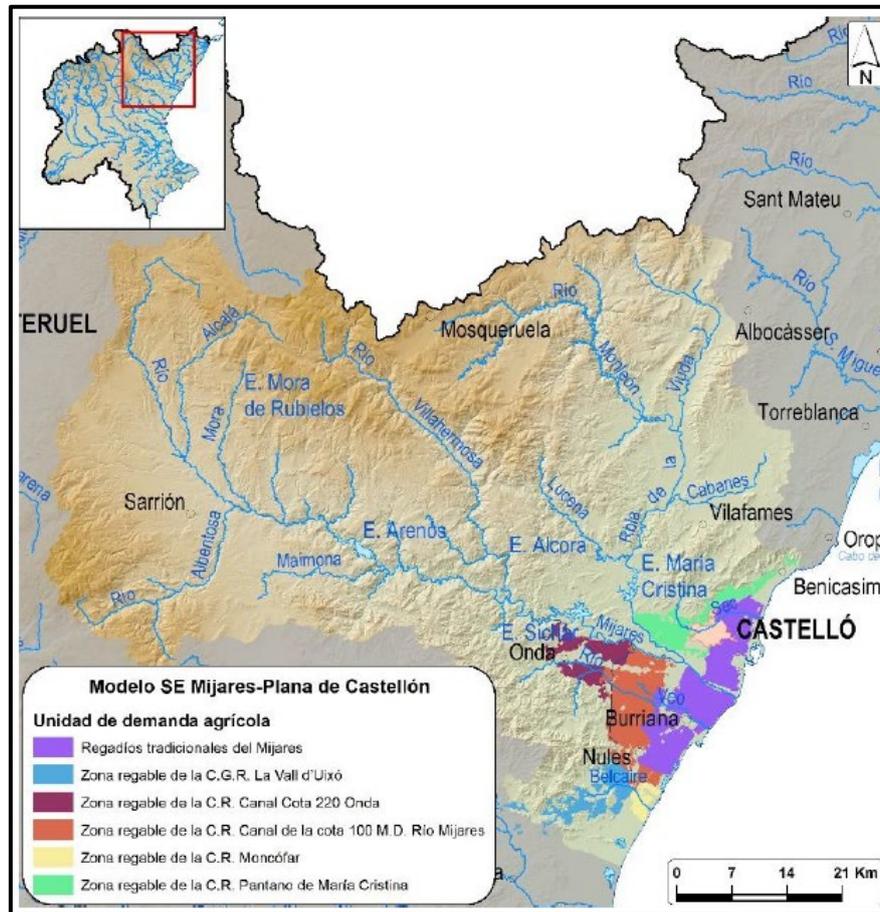
**Tabla 6.** Caudales ecológicos mensuales en hm<sup>3</sup> por masa de agua superficial consideradas en el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022.

#### 4.4.7. Demandas

El modelo de gestión cuenta con seis unidades de demanda agrícola (UDA): Canal Cota 220, María Cristina, Canal Cota 100, Regadíos Tradicionales, Vall d'Uixó y Moncófar. Sus demandas anuales en situación actual son 13, 12.6, 40.5, 62.6, 11.5 y 2.3 hm<sup>3</sup>, respectivamente (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022). En la Figura 8 se observa la distribución mensual

de cada una de ellas, sobre esto se resalta la importancia de las demandas en los meses de junio y julio.

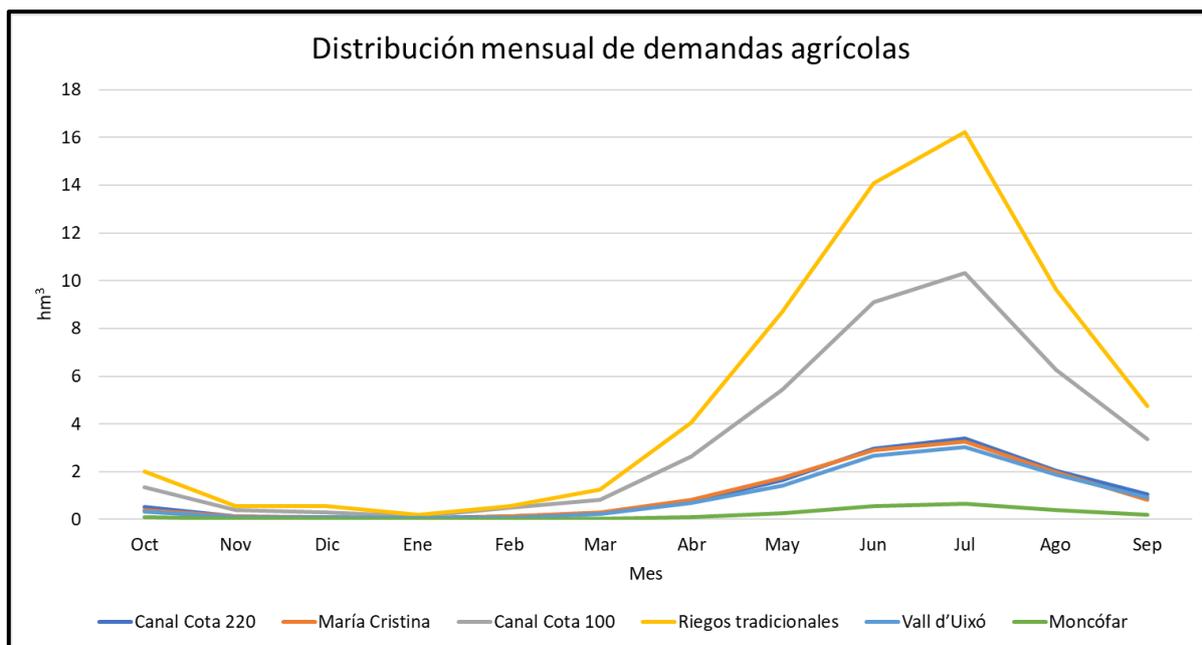


**Figura 7.** UDA consideradas en el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022.

En el apartado “4.4.4. Acuíferos” cuando se menciona sobre los regadíos mixtos se refiere específicamente a las áreas comprendidas por las UDA de Canal Cota 220, Canal Cota 100 y María Cristina. Se denominan así por ser aquellas demandas agrícolas que alternan entre suministros de recursos superficiales y subterráneos en función de una regla de operación basada en el nivel de los volúmenes embalsados en Arenós y Sichar (Figura 9), a diferencia de la UDA de los Riegos Tradicionales que principalmente suministra recursos superficiales y solo en periodos de escasez se bombea recursos subterráneos.

En cuanto a los acuíferos a los que infiltran cada una de las demandas se agrupan de la siguiente forma: las UDA de Canal Cota 220, Canal Cota 100, María Cristina y Riegos Tradicionales recargan al acuífero de la Plana de Castelló, y las UDA de Vall d’Uixó y Moncófar filtran al acuífero de Azuébar – Vall d’Uixó.



**Figura 8.** Distribución mensual de las demandas agrícolas en  $hm^3$  consideradas en el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Los coeficientes de consumo, retorno y pérdidas para cada una de las demandas agrícolas se calcularon a partir de la información del Anejo 3 del PHJ22/27 (Tabla 7). El coeficiente de consumo se refiere a la relación entre la cantidad de agua que se utiliza por los cultivos y la cantidad de agua que se aplica. Está definido por la eficiencia global del sistema de riego que está influenciada por las eficiencias de transporte, distribución y aplicación. El coeficiente de retorno es la relación entre la cantidad de agua que retorna al sistema y la cantidad de agua que se aplica. El coeficiente de pérdidas se refiere a la relación entre la cantidad de agua que se pierde por evaporación desde la superficie del suelo y la cantidad de agua que se aplica.

UDA	Coef. Consumo	Coef. Retorno	Pérdidas
Canal Cota 220	0.719	0.275	0.006
María Cristina	0.605	0.381	0.015
Canal Cota 100	0.556	0.429	0.015
Riegos tradicionales	0.497	0.463	0.040
Vall d'Uixó	0.741	0.253	0.006
Moncófar	0.749	0.249	0.000

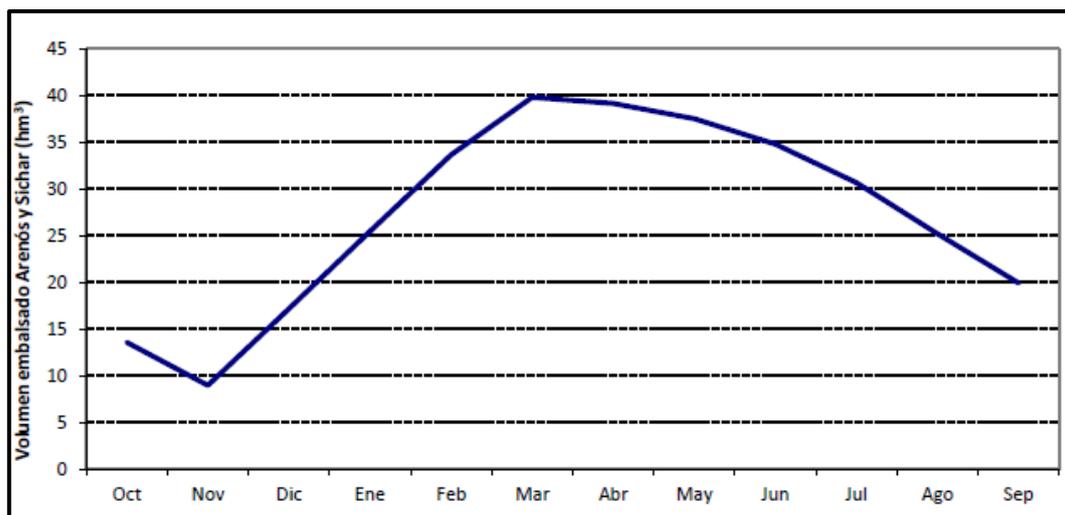
**Tabla 7.** Coeficientes de consumo, retorno y pérdidas para cada una de las UDA.

Fuente: Elaboración propia.

#### 4.4.8. Regla de operación

Tal y como ha sido mencionado anteriormente, los riegos mixtos (UDA Canal Cota 220, Canal Cota 100 y María Cristina) están limitados por una regla de operación, acordada por los usuarios en el “Convenio de bases para la ordenación de las aguas del río Mijares” de 1970, y establece que la UDA de los Riegos Tradicionales tiene prioridad sobre el uso de los recursos superficiales del río Mijares. En la Figura 9 se presenta la distribución mensual de la curva de reserva ampliada y es evaluada según la suma de los volúmenes embalsados en Arenós y Sichar. Cuando el volumen embalsado total se encuentre por debajo de la curva de reserva solo se podrá suministrar con recursos superficiales del río Mijares a la UDA de los Riegos Tradicionales, y cuando esté por encima se podrá suministrar con los recursos superficiales tanto a los riegos mixtos como a los tradicionales.

En el modelo de gestión se asignó esta regla en las tomas superficiales de las UDA de Canal Cota 220, Canal Cota 100 y María Cristina, ubicados en los nudos 48, 49 y 50, respectivamente.



**Figura 9.** Curva de restricción para los riegos mixtos del río Mijares en base a los volúmenes embalsados en Arenós y Sichar.

Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022.

#### 4.4.9. Tomas de agua superficial, subterránea, reutilización y desalinización

Los recursos hídricos suministrados en las demandas agrícolas provienen de diferentes fuentes, que pueden ser tanto de origen convencional (superficial y subterráneo) como no convencional (reutilización y desalinización). En el modelo se discretizaron por tomas de agua superficial, subterránea, reutilización y desalinización acorde con el origen del recurso que se conduce a cada demanda agrícola.

Las tomas de agua superficiales se refieren a las conducciones que suministran con recursos naturales superficiales a las demandas agrícolas, en este caso provienen del río Mijares o del río Belcaire (manantial de San José). Adicionalmente a éstos, en la Tabla 8 se puede apreciar como recurso superficial al río Veo, fuente para el suministro a la UDA de Canal Cota 100; en el modelo se consideró el total de 21.6 hm<sup>3</sup> como capacidad máxima anual desde la toma del río Mijares hasta la demanda agrícola.

En cuanto a las tomas subterráneas, son representaciones que agrupan los bombeos realizados por los regantes de cada UDA para satisfacer las demandas agrícolas. Como fuentes se tienen los acuíferos de la Plana de Castellón y Azuébar – Vall d’Uixó. Cabe mencionar que los bombeos para la UDA de los Riegos Tradicionales se dan a través de pozos de sequía que entran en operación cuando el sistema se encuentre en un periodo de escasez.

Respecto a las tomas de reutilización, representan las conducciones que transportan recursos regenerados provenientes de las EDAR. En situación actual solo la EDAR de Vall d’Uixó es la única que aporta un recurso regenerado para el suministro a la UDA de Vall d’Uixó.

UDA	Superficial (hm <sup>3</sup> /año)		Subterráneo (hm <sup>3</sup> /año)		Reutilización (hm <sup>3</sup> /año)	
	Curso	Volumen	Origen	Volumen	EDAR	Volumen
Riegos tradicionales	Río Mijares	62.6	Pozos sequía	13.9		
Canal Cota 100	Río Mijares	21	Pozos	40.5		
	Río Veo	0.6				
Canal Cota 220	Río Mijares	5.5	Pozos	13		
María Cristina	Río Mijares	7.4	Pozos	12.6		
Vall d’Uixó	Río Belcaire	0.7	Pozos	9.3	Vall d'Uixó	1.5
Moncófar			Pozos	2.3		

**Tabla 8.** Capacidad máxima de suministro (hm<sup>3</sup>/año) de las distintas fuentes suministradas a las UDA en el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022.

Por último, las tomas de desalinización se refieren a las conducciones que suministran a las demandas agrícolas con recursos no convencionales provenientes de la desalinización de agua de mar. En la tabla no se menciona esta toma, debido a que actualmente no se utiliza en el sistema de explotación. No obstante, más adelante será contemplada la desalinizadora de Moncófar y objeto de evaluación.

#### 4.4.10. Centrales hidroeléctricas

El sistema de explotación Mijares – Plana de Castellón cuenta con 11 centrales hidroeléctricas, sin embargo, en el modelo de gestión solo se han considerado aquellas situadas aguas abajo de los principales embalses, siendo en total siete (Cirat, Colmenar, Hidro, Onda, Ribesalbes, Vallat y Villarreal). Esto es debido a que la gestión de los recursos hídricos afecta directamente en la producción de energía eléctrica de estas siete centrales.

Las centrales hidroeléctricas funcionan en régimen fluyente, es decir, fluye el recurso a las centrales y turbinan todo el caudal del tramo del río a excepción del caudal ecológico establecido en el apartado “4.4.6. Caudales ecológicos” y sin exceder el caudal máximo de derivación (Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos, 2012).

UDH	Tipo	Caudal máximo (m <sup>3</sup> /s)	Salto bruto (m)	Coefficiente energético (GWh/hm <sup>3</sup> /m)
Cirat	Fluyente	12	124.9	0.00193
Vallat	Fluyente	16	104.5	0.00191
Ribesalbes	Fluyente	12	70.9	0.00206
Colmenar	Fluyente	12	56.6	0.00158
Onda	Fluyente	8	13.2	0.00219
Hidro	Fluyente	7.5	13.2	0.00147
Villarreal	Fluyente	7.5	7.3	0.00147

**Tabla 9.** Características de las centrales hidroeléctricas consideradas en el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022.

#### 4.4.11. Bombeos

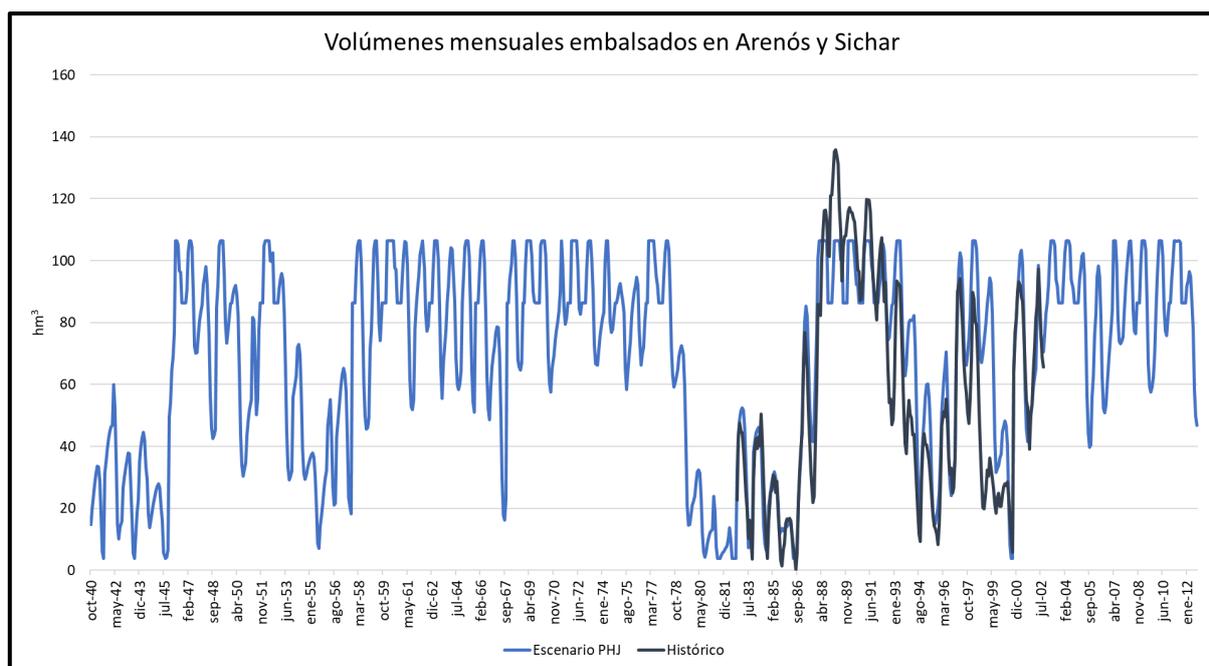
En relación con los bombeos, se tiene un elemento de bombeo para cada acuífero. La capacidad máxima impuesta en cada uno responde a la suma de las demandas agrícolas que suministra en el mes de julio, dado que es el mes de mayor demanda en todas las UDA tal y como se aprecia en la Figura 8. En base a ello, los bombeos de los acuíferos de la Plana de Castellón y Azuébar – Vall d’Uixó tuvieron capacidades mensuales de 20.6 y 3.7 hm<sup>3</sup>, respectivamente.

Analizando las asignaciones y reservas en el sistema de explotación del PHJ16/21, se observó que todas las asignaciones superficiales y subterráneas eran mayores a las capacidades máximas del modelo a excepción de la asignación de recursos subterráneos para la UDA de María Cristina, el cual era de 6.7 hm<sup>3</sup> por año (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2015). En el modelo se limitó el volumen máximo a suministrar según el valor indicado.

## 5. Análisis de la situación actual del sistema

A la situación actual del sistema de explotación de los recursos hídricos Mijares – Plana de Castellón se le denominó como “Escenario PHJ”, debido a que el modelo de gestión se desarrolló considerando la información presentada en el PHJ22/27 descrita en el apartado “4.4. Desarrollo del modelo conceptual de la gestión”.

Con los resultados de la simulación se realizó la calibración comparando la suma de los volúmenes embalsados en Arenós y Sichar con los datos históricos obtenidos del Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Esta información presenta los volúmenes embalsados entre los años 1982 y 2002, es por ello que la calibración comprende solo dicho periodo. En la Figura 10 se puede observar que se mantiene una buena relación con los resultados de la simulación del escenario base de calibración, a su vez se constató que la simulación del presente escenario también guarda relación con la obtenida en el PHJ22/27.



**Figura 10.** Simulación de los volúmenes embalsados mensuales en Arenós y Sichar ( $hm^3$ ) en el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

También se observa de la simulación que el número de llenados fue de 101 veces, y el de vaciados 15 veces. Los volúmenes alcanzados fueron de 106.5 y 3.9  $hm^3$ , lo cual corresponde con las capacidades máximas y mínimas ingresadas al modelo en ambos embalses.

Del modelo se obtuvo el volumen suministrado a cada demanda agrícola. La Figura 11 muestra los volúmenes anuales discretizados según el origen del recurso y la zona de regadío (Riegos Tradicionales, Riegos Mixtos, Vall d'Uixó y Moncófar). Los resultados se presentaron de esta forma con la finalidad de compararlos con la Figura 12, en donde se puede apreciar los resultados del modelo de gestión del PHJ22/27 con los volúmenes suministrados a las mismas zonas de regadío.

El PHJ22/27 presenta los resultados en base al periodo 1940-2018, mientras que el modelo elaborado en el presente trabajo comprende el periodo 1940-2011. Esto se da principalmente por la falta de datos para el periodo 2011-2018 de las aportaciones de María Cristina, Belcaire a Balsa y Belcaire – Manantial San José.

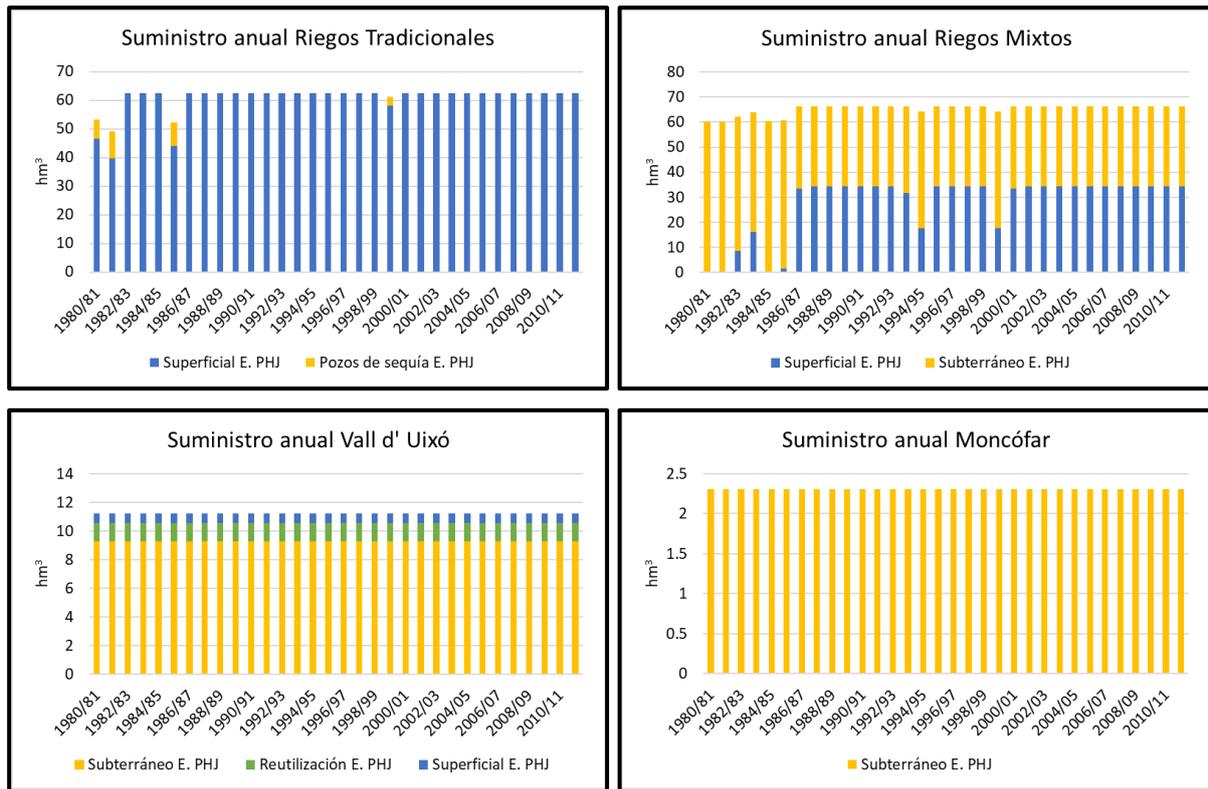
Sobre la comparación de ambas figuras (Figura 11 y Figura 12), se puede indicar que existe una semejanza en los suministros a todas las UDA en el modelo del presente trabajo y el del PHJ22/27. Acorde con ello se presenta la Tabla 10, en ella se presentan suministros promedio anuales similares que varían entre 0 y 0.79 hm<sup>3</sup>. Por ejemplo, para la UDA Riegos Tradicionales el volumen anual medio suministrado con recursos superficiales fue de 61.3 hm<sup>3</sup> en el modelo del PHJ22/27 y 61.6 hm<sup>3</sup> en el modelo desarrollado en este trabajo.

UDA	Fuente	Volumen medio suministrado (hm <sup>3</sup> )	
		Modelo PHJ22/27	Modelo actual
Riegos tradicionales	Superficial	61.3	61.62
	Subterráneo	0.2	0.47
Riegos Mixtos	Superficial	29.2	28.51
	Subterráneo	36	36.79
Vall d'Uixó	Superficial	0.7	0.7
	Subterráneo	9.3	9.3
	Reutilización	1.5	1.28
Moncófar	Subterráneo	2.3	2.3

**Tabla 10.** Suministro promedio anual en hm<sup>3</sup> a las UDA de la zona de estudio.

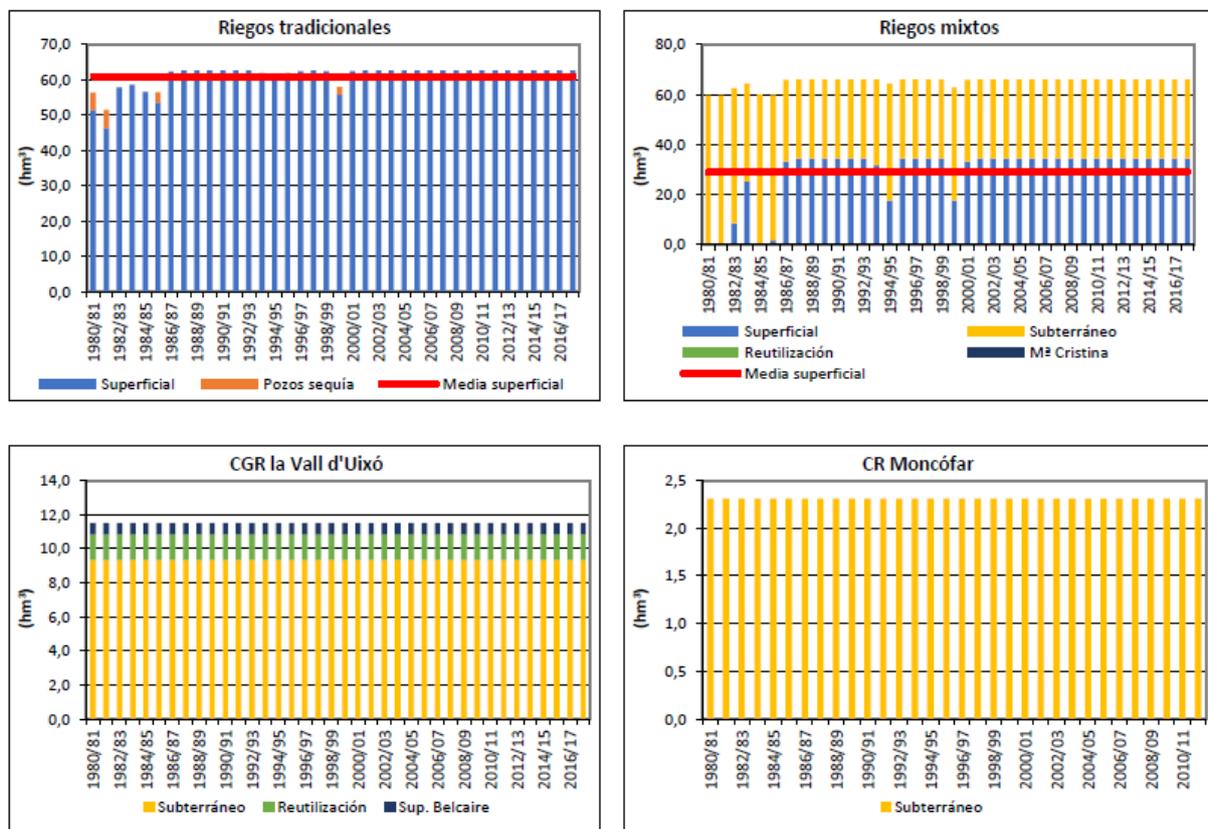
Fuente: Elaboración propia.

Las variaciones en los riegos tradicionales y mixtos se pueden explicar por las diferencias propias entre las simulaciones de los volúmenes embalsados en ambos modelos que, al estar afectados por una regla de operación en ellas, afecta directamente al suministro a cada UDA.



**Figura 11.** Suministro a las demandas agrícolas ( $\text{hm}^3$ ) en situación actual de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.



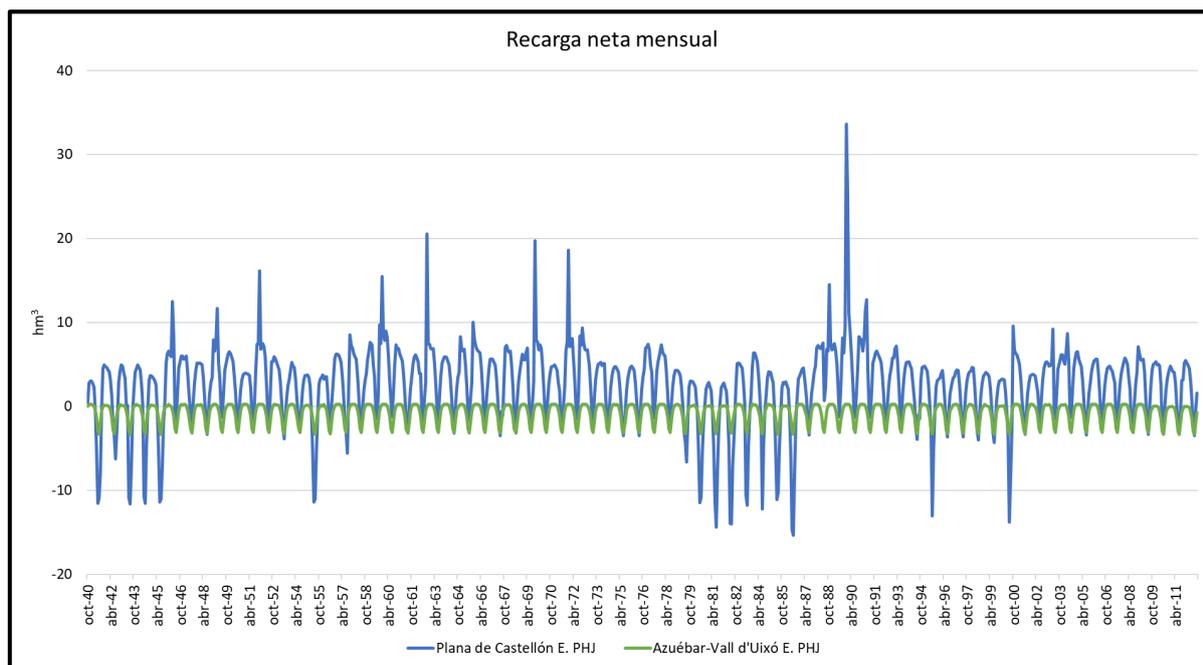
**Figura 12.** Suministro a las demandas agrícolas ( $\text{hm}^3$ ) en situación actual en el modelo desarrollado en el PHJ22/27.

Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022.

Por otro lado, en el caso del volumen suministrado a la UDA de Vall d'Uixó con recursos de la reutilización tiene otra explicación. El PHJ22/27 indica que la totalidad del volumen regenerado por la EDAR de Vall d'Uixó de  $1.5 \text{ hm}^3$  se suministra a esta demanda. Sin embargo, como la población que trata la EDAR no varía mucho a lo largo del año, el volumen de vertidos mensuales es similar en todos los meses. Esto significa que habrá excedentes de la EDAR en los meses de baja demanda hídrica, en la simulación se da entre noviembre y febrero. En consecuencia, el volumen medio anual suministrado no podría ser igual al total de recursos regenerado de  $1.5 \text{ hm}^3$ .

A nivel general, los recursos subterráneos representan una fuente importante para satisfacer las demandas agrícolas del sistema, a excepción de la UDA de los Riegos Tradicionales que solo hacen uso del recurso en épocas de escasez. El volumen medio anual bombeado asciende a  $37.26$  y  $11.6 \text{ hm}^3$  para los acuíferos de la Plana de Castellón y Azuébar – Vall d'Uixó, respectivamente. Pese a que se bombea un mayor volumen del acuífero de la Plana de Castellón, éste solo satisface el 29% de las demandas que suministra, a diferencia del acuífero de Azuébar – Vall d'Uixó que satisface el 84.1% de las demandas correspondientes. Esto resalta la importancia de mantener en buen estado esta masa de agua subterránea y la necesidad de implementar medidas de gestión sostenibles en el tiempo para preservar la calidad y cantidad del recurso disponible.

Respecto a las recargas netas de las masas de agua subterránea, que representa la diferencia de los volúmenes infiltrados menos los volúmenes bombeados, en la Figura 13 se aprecia que el acuífero de la Plana de Castellón presenta una recarga neta media mensual de  $2.53 \text{ hm}^3$  (con variaciones mensuales entre  $33.6$  y  $-15.31 \text{ hm}^3$ ), mientras que para el acuífero de Azuébar – Vall d'Uixó es  $-0.76 \text{ hm}^3$  (con variaciones mensuales entre  $0.26$  y  $-3.36 \text{ hm}^3$ ). El tener un valor positivo como media mensual nos indica que ese acuífero tiene una recarga por infiltración mayor que el bombeo, mientras que un valor negativo indica lo contrario.



**Figura 13.** Simulaciones de recargas netas mensuales ( $\text{hm}^3$ ) en los acuíferos en el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

En otras palabras, se prevé que el acuífero de Azuébar – Vall d’Uixó sufrirá un mayor descenso en su nivel piezométrico y una disminución en el volumen almacenado de continuar con los bombeos excesivos, lo que agravaría más la problemática actual de la intrusión salina.

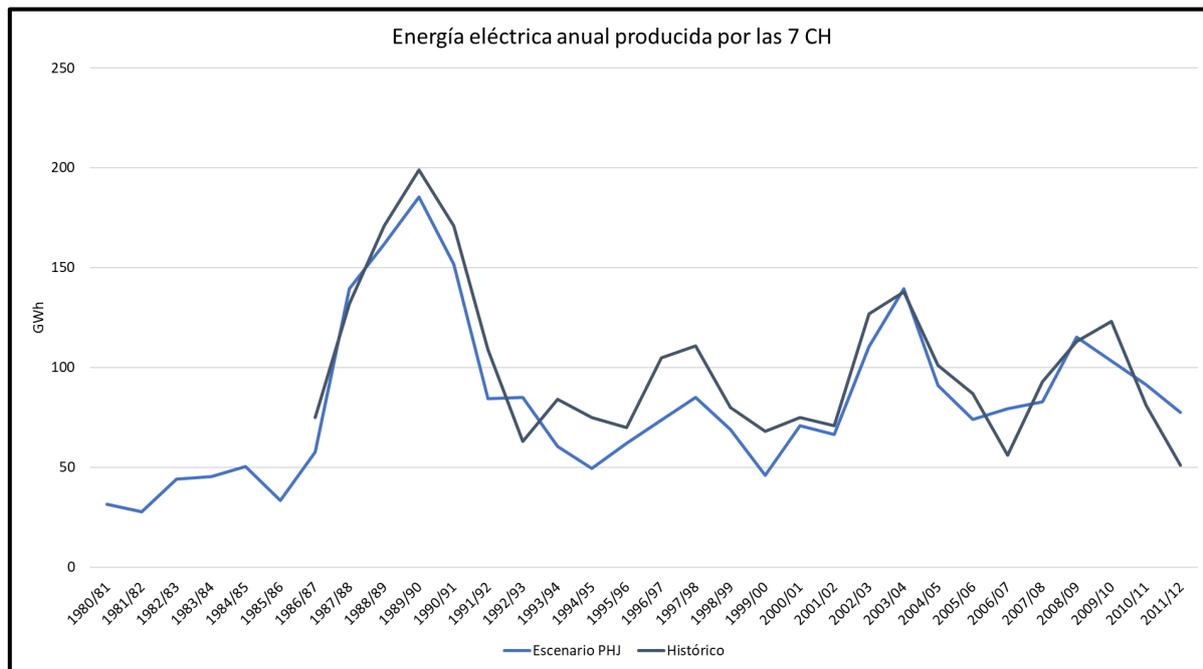
En relación con las garantías de las demandas de agua, se constata que el criterio IPH o legal cumplió en todas las demandas agrícolas analizadas a excepción de la UDA de María Cristina, específicamente en los máximos déficits de 2 y 10 años consecutivos (sobrepasando el 75 y 100% de la demanda anual, respectivamente). En el PHJ22/27 solo se hace mención de que se cumplen los criterios de garantía para la UDA de los Riegos Tradicionales, lo cual es de igual cumplimiento con el modelo desarrollado.

Cabe indicar que se obtuvieron los déficits ponderados en función de grupos de interés conformados de la siguiente forma:

- UDA Riegos Tradicionales
- UDA Cota 220, Cota 100 y María Cristina
- UDA Vall d’Uixó y Moncófar

El primer grupo obtuvo un déficit anual de  $0.51 \text{ hm}^3$ , el segundo  $0.17 \text{ hm}^3$  y el tercero  $0.18 \text{ hm}^3$ . Relacionándolos con la demanda respectiva presentaron déficits anuales de 0.81%, 0.26% y 1.33%.

Por último, de la simulación del modelo de gestión se obtuvo que la energía hidroeléctrica media anual producida fue de 83 GWh; en el PHJ22/27 la energía anual producida asciende a 88.6 GWh. Además de estos valores, tal y como se observa en la Figura 14, la simulación anual también guarda relación el registro histórico de energía hidroeléctrica producida entre los años 1986 y 2012 (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022).



**Figura 14.** Simulación de la energía hidroeléctrica producida anualmente (GWh) en el modelo de gestión de la zona de estudio.

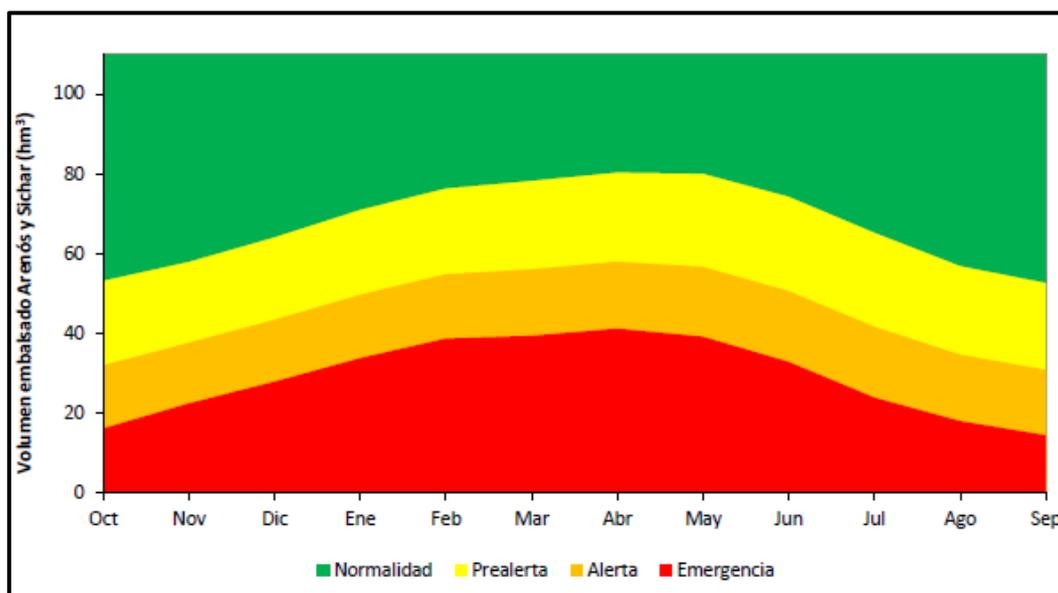
Fuente: Elaboración propia.

En base a los resultados de este apartado y las comparaciones con los resultados del modelo presentado en el PHJ22/27 se puede concluir que **el modelo desarrollado en este trabajo reproduce de manera satisfactoria tanto los datos históricos como los resultados del modelo del PHJ**. Una vez calibrado el modelo, se empleó para analizar la influencia de las reglas de operación del Plan Especial de Sequía y su efecto en las diferentes medidas de gestión propuestas en el PHJ22/27.

## 6. Análisis de la situación actual con restricciones del Plan Especial de Sequía

En el análisis del PHJ22/27 se identificó que no se tuvo en cuenta la gestión que se define en el Plan Especial de Sequía 2018 (PES), lo cual puede modificar las conclusiones del balance de la cuenca. Por esta razón, con el modelo de gestión calibrado se incorporaron los criterios del PES como reducciones de los suministros a las demandas agrícolas y del caudal ecológico en situación de sequía prolongada.

Respecto a las reducciones de los suministros, en el PHJ22/27 se establecen unas curvas basadas en la suma de los volúmenes embalsados en Arenós y Sichar para estimar el escenario de escasez, tal como se observa en la Figura 15. Se simplificó el sistema de indicadores del PES de forma que solo tenga en cuenta la suma de los volúmenes embalsados por el peso preponderante que tiene el indicador del volumen embalsado en el indicador conjunto de la unidad territorial y para facilitar la operación del modelo (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022).



**Figura 15.** Curvas de volúmenes embalsados en Arenós y Sichar obtenidas para estimar el escenario de escasez en la zona de estudio.

Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022.

Sobre las curvas definidas anteriormente, en la Tabla 11 se detalla el porcentaje de reducción de los suministros por cada demanda agrícola en función del escenario de escasez. En general, a medida que la situación de escasez sea más crítica, mayor será la reducción de los suministros como medida de ahorro de los recursos hídricos.

UDA	Origen	Porcentajes de reducción			
		Normalidad	Prealerta	Alerta	Emergencia
Riegos tradicionales	Total	0%	0%	5%	10%
	Superficial	0%	0%	15%	25%
Canal Cota 220	Total	0%	0%	0%	10%
María Cristina	Total	0%	0%	0%	10%
Canal Cota 100	Total	0%	0%	0%	10%
Vall d'Uixó	Total	0%	0%	0%	10%
Moncófar	Total	0%	0%	0%	10%

**Tabla 11.** Porcentaje de reducción de los suministros en función del escenario de escasez en la zona de estudio.

Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022.

En contraparte, como es de esperar en el caso de los pozos de sequía para el suministro a la UDA de los Riegos Tradicionales, la capacidad autorizada para la extracción de los recursos subterráneos será mayor a medida que la situación de escasez sea más crítica. Esto guarda relación con la función propia de estos pozos. Los porcentajes de capacidad autorizada se presentan en la Tabla 12.

UDA	Origen	Porcentaje de la capacidad autorizado			
		Normalidad	Prealerta	Alerta	Emergencia
Riegos tradicionales	Pozos de sequía	0%	0%	50%	75%

**Tabla 12.** Porcentaje de capacidad autorizado de recursos extraordinarios en función del escenario de escasez en la zona de estudio.

Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022.

Por otro lado, en cuanto a los caudales ecológicos requeridos para la zona de estudio, detallados en el apartado "4.4.6. Caudales ecológicos", se debe tener en cuenta que en situación de sequía el PES carece de fuerza jurídica para introducir cambios en el régimen de caudales ecológicos (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2018). Es por ello que se consideraron las modificaciones propuestas en el PHJ22/27, en las cuales se establece reducciones del 20% de los caudales ecológicos, solo en situación de sequía prolongada, en los tramos del río que no estén incluidos en zonas de la red Natura 2000.

En la base de datos de la red Natura 2000 (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023b), se identificaron los tramos del río Mijares que no pertenecen a estas zonas con la finalidad de aplicar la reducción del caudal ecológico en periodos de sequía prolongada. Como resultado se tuvo que los tramos entre el embalse de Sichar y la confluencia

de los ríos del Mijares con la Rambla de la Viuda no se ubican en estas zonas de protección por la red Natura 2000.

Cuando se hace referencia a la sequía prolongada, en el PES se define como un estado de emergencia, tomando como base las disposiciones normativas del plan hidrológico de la DHJ aprobadas por el Real Decreto 1/2016 (Confederación Hidrográfica del Júcar, 2018). En referencia a lo mencionado, en el presente trabajo se consideró que la situación de sequía prolongada corresponde a un nivel de emergencia.

Para todas las modificaciones descritas en este apartado se incluyeron en el modelo reglas de operación específicas basadas en los volúmenes embalsados en Arenós y Sichar bajo los distintos escenarios de escasez. Por ejemplo, de la Tabla 11 se generaron las reglas de operación “Esc\_escasez RT total”, “Esc\_escasez RT superficial” y “Esc\_escasez\_RM y Vdu Monc”; de la Tabla 12, la regla “Esc\_escasez RT pozos”; y para los caudales ecológicos bajo el escenario de escasez de emergencia, “Qeco sequía”. En la Figura 17 se puede observar la asignación de las reglas de operación mencionadas.

Debido a que el presente apartado servirá como base para el análisis de las medidas propuestas por el PHJ22/27 en los siguientes apartados, se le denominó “Escenario Base”. Esto permitirá distinguirlo de los resultados del “Escenario PHJ”.

Como resultado de la simulación considerando los escenarios de escasez, se obtuvo, en lo referido a los volúmenes embalsados en Arenós y Sichar (Figura 17), una simulación mensual con una variación significativa en el número de vaciados en comparación con la simulación del apartado anterior, pasando de 15 a 0 veces, con un volumen mínimo de  $9.93 \text{ hm}^3$ . Por otro lado, el número de llenados se mantuvo en 101 veces.

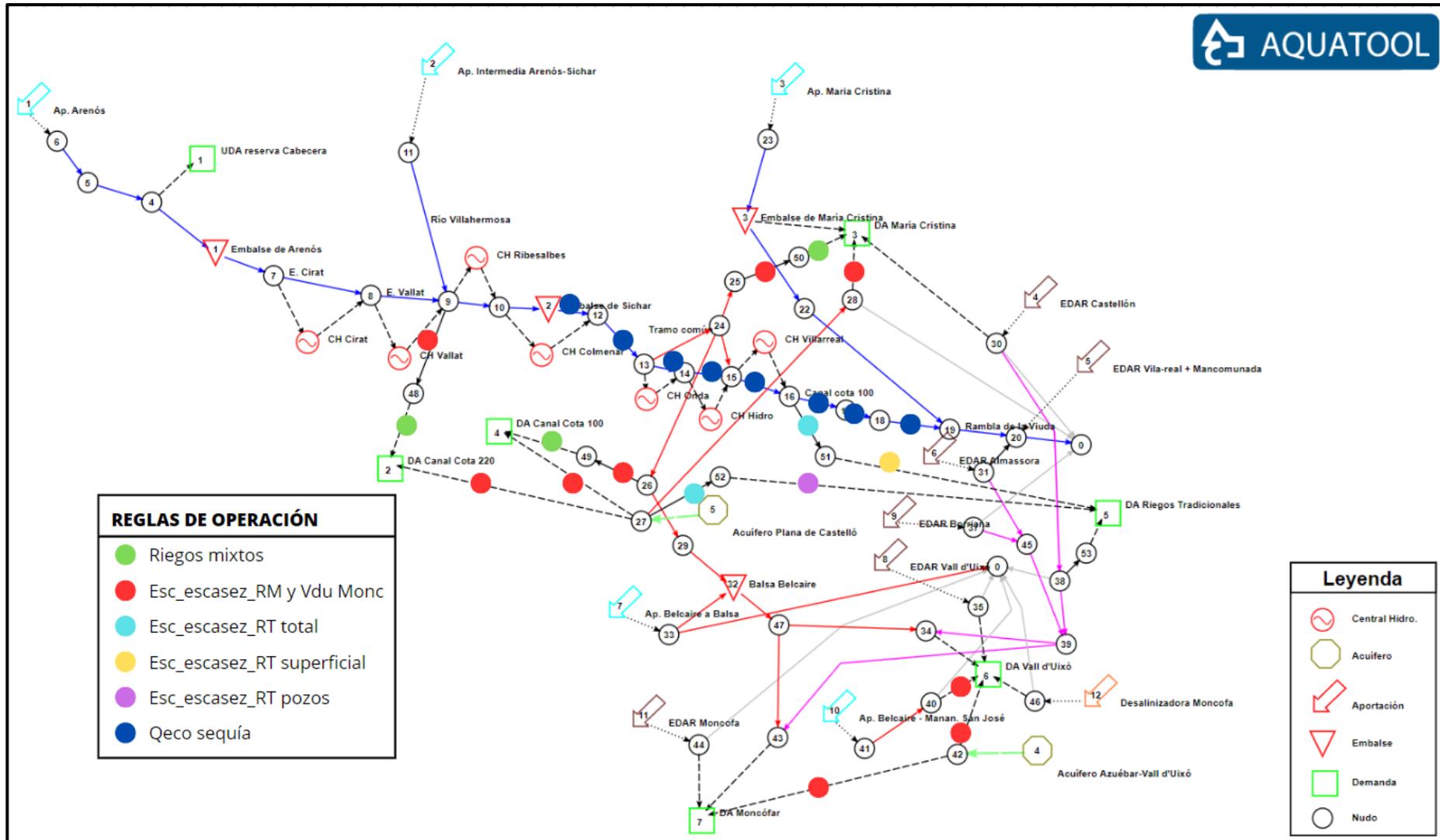
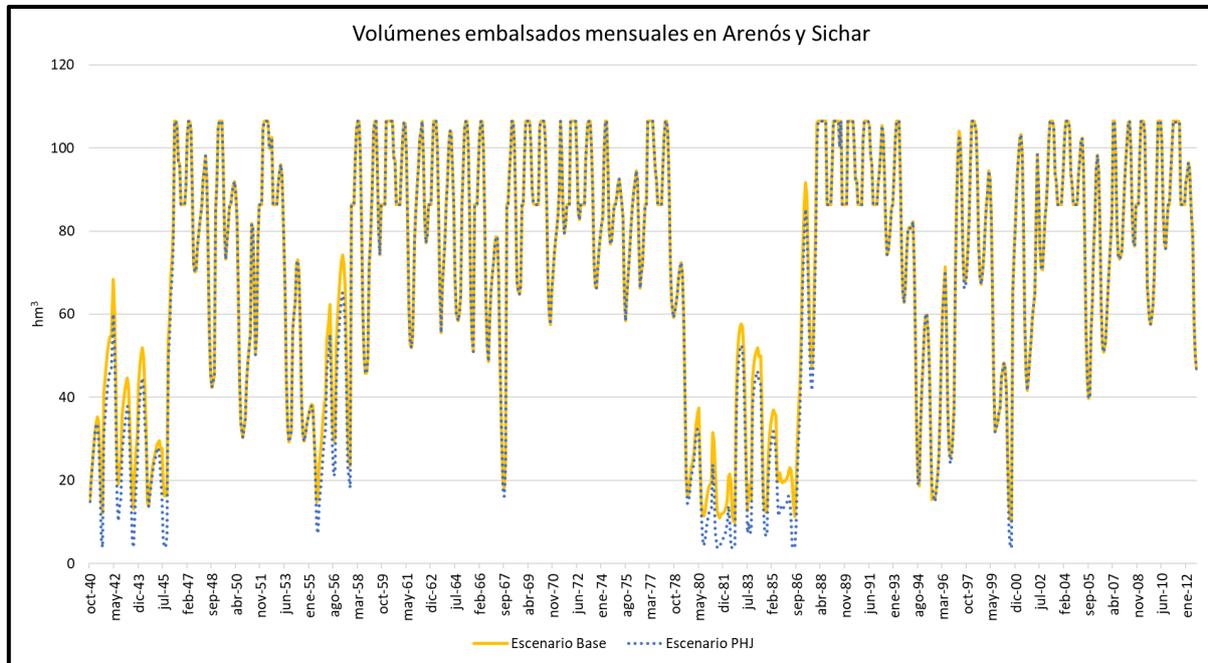


Figura 16. Esquema topológico en SIMGES de la zona de estudio con las reglas de operación.

Fuente: Elaboración propia.

Este resultado es coherente con el objetivo del PES que es reducir el volumen de suministro a las diversas demandas en periodos de sequía, lo cual repercute directamente en los embalses al no permitir que se vacíen por completo. El contar con mayores recursos embalsados en periodos de escasez o sequía permite garantizar un suministro mínimo en momentos críticos.



**Figura 17.** Simulación mensual de los volúmenes embalsados en Arenós y Sichar ( $hm^3$ ) en situación actual sin y con los escenarios de escasez en el modelo de gestión de la zona de estudio.

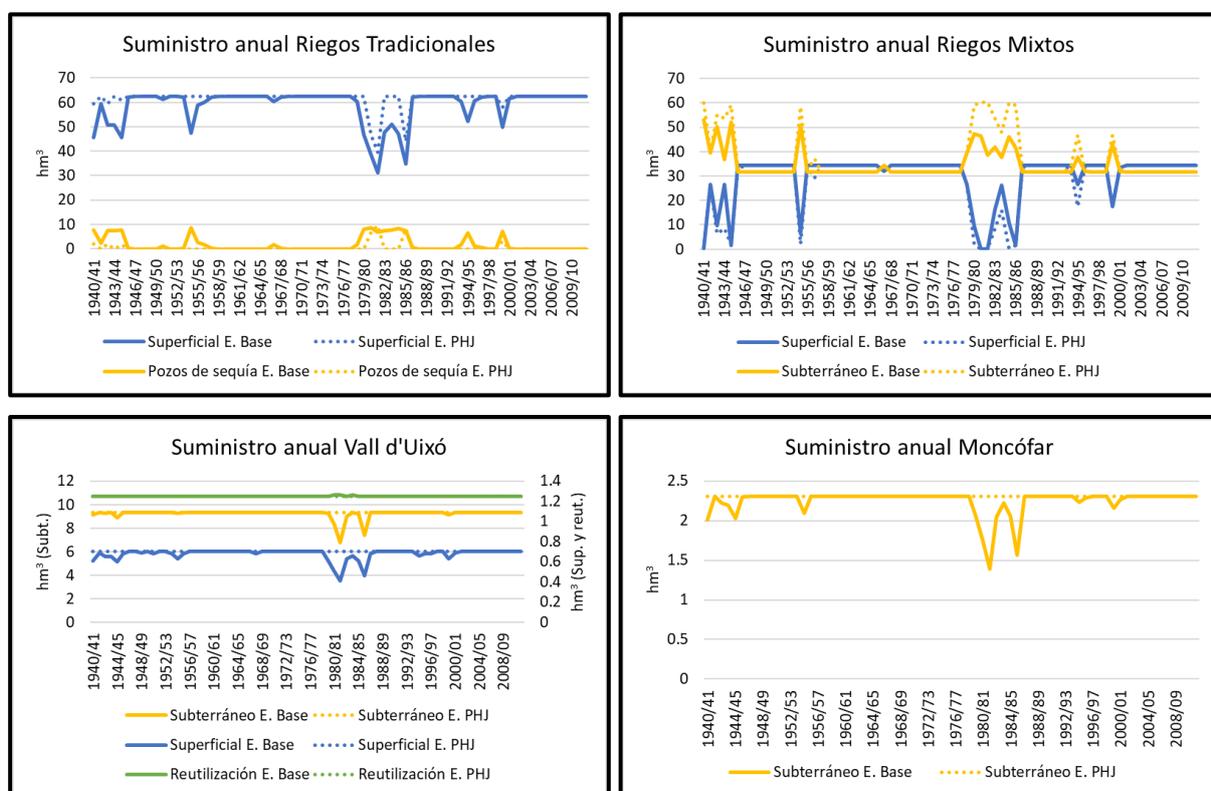
Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al suministro a la UDA de los Riegos Tradicionales es importante resaltar que las restricciones en el uso de agua superficial en periodos de escasez hacen que los bombeos de los pozos de sequía se activen más veces que en situación actual por haber más periodos de escasez hídrica, tal y como se aprecia en la Figura 18. El volumen promedio anual bombeado aumentó de 0.47 a 1.71  $hm^3$ ; además de que el número de veces en las que se activaron los pozos de sequía es mayor. Se debe tener en cuenta que la capacidad autorizada de bombeo también aumenta en periodos de escasez.

En lo que se refiere a los bombeos de los riegos mixtos, se presentaron reducciones en los promedios anuales de bombeo en cada una de ellas entre 0.05 y 1.77  $hm^3$ . En la Figura 18 se observa que las reducciones de los bombeos se dan principalmente en los periodos de escasez hídrica. Respecto a los suministros superficiales, la reducción del suministro superficial a la UDA Riegos Tradicionales permite suministrar un mayor volumen promedio anual a los riegos

mixtos (de 28.51 a 29.65 hm<sup>3</sup>), incluso considerando las reducciones del suministro por las reglas de operación.

En cuanto a los suministros de las UDA de Vall d'Uixó y Moncófar, la inclusión de los escenarios de escasez genera reducciones de los bombeos en situación de escasez, por ejemplo, las reducciones presentadas entre los años 1979 y 1988. El promedio anual del bombeo para el suministro a cada una se ve reducido de 9.3 a 9.21 hm<sup>3</sup> para Vall d'Uixó y de 2.3 a 2.24 hm<sup>3</sup> para Moncófar. En el caso de la reutilización del recurso regenerado por la EDAR de Vall d'Uixó, el suministro no se ve afectado en periodos de escasez, debido a que las reglas de operación solo afectan a los recursos convencionales.

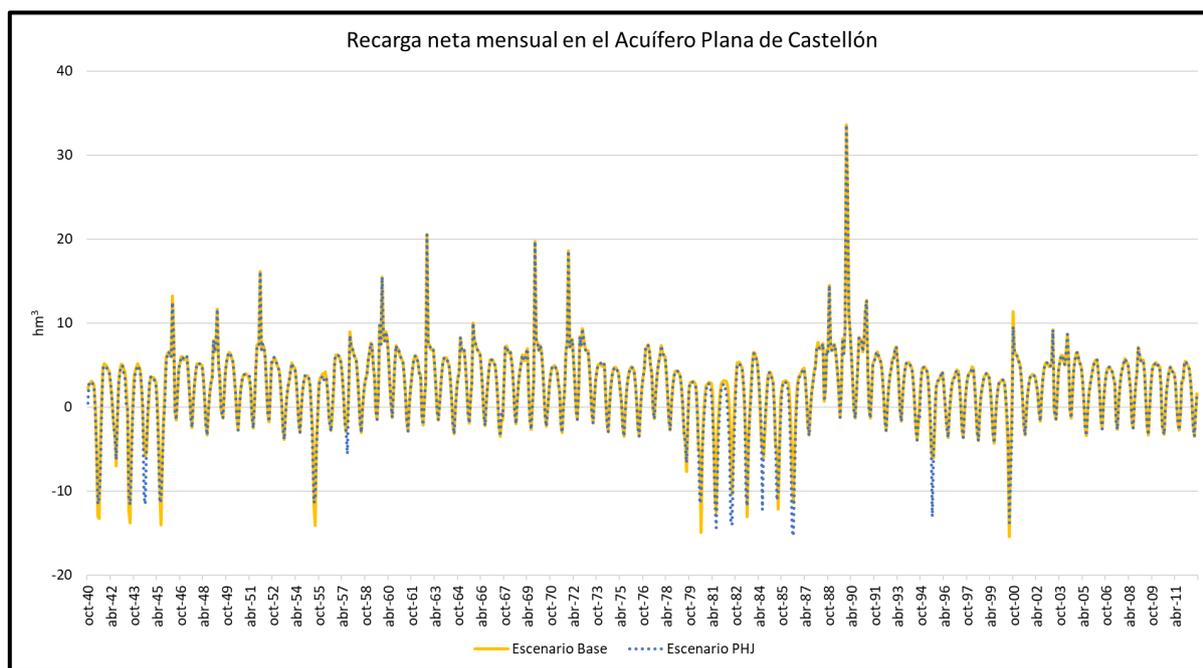


**Figura 18.** Suministro a las demandas agrícolas (hm<sup>3</sup>) en situación actual sin y con PES en la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

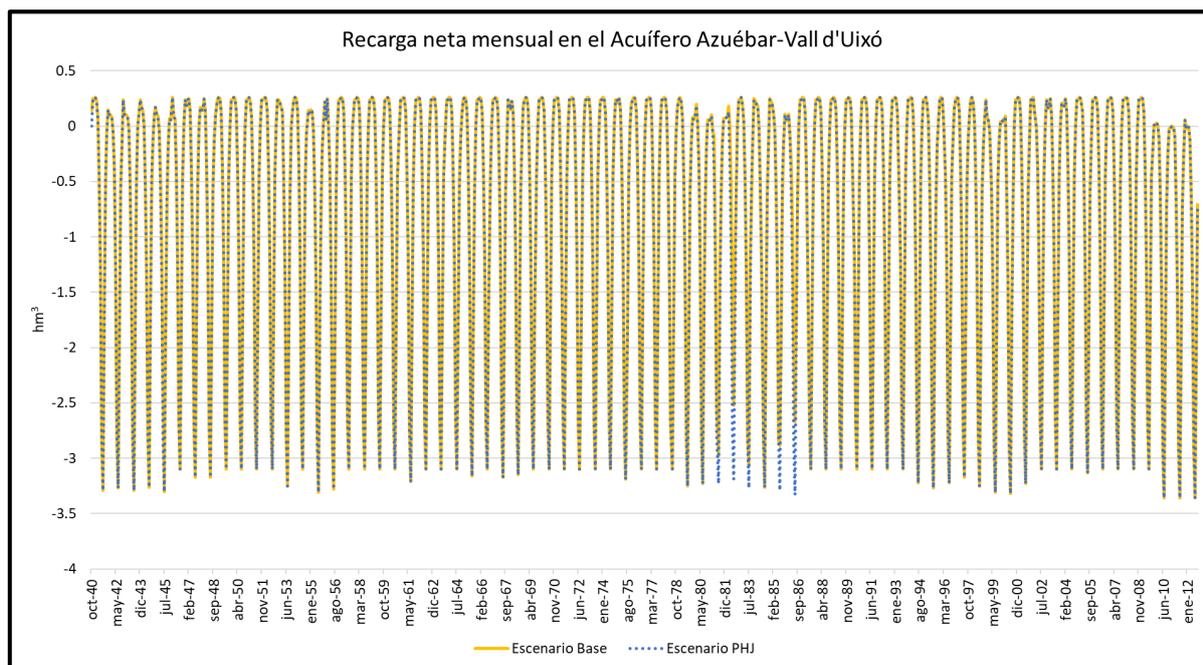
A nivel de acuífero, en el acuífero de la Plana de Castellón, pese al aumento del volumen bombeado a la demanda agrícola de los Riegos Tradicionales, la disminución de los bombeos en las UDA de riegos mixtos genera un decremento total del volumen promedio anual bombeado de 37.26 hm<sup>3</sup> (en situación actual) a 36.16 hm<sup>3</sup>. En el acuífero de Azuébar – Vall d'Uixó el volumen se reduce de 11.6 a 11.45 hm<sup>3</sup>.

Tras el análisis de la recarga neta en ambos acuíferos, se obtuvo que las medidas implementadas por el PHJ22/27 y el PES tuvieron como resultado un aumento en las recargas netas. En el acuífero de la Plana de Castellón (Figura 19), el promedio de la recarga neta mensual aumentó de 2.53 a 2.68 hm<sup>3</sup>, y para el acuífero de Azuébar – Vall d’Uixó (Figura 20) aumentó de -0.76 a -0.74 hm<sup>3</sup>. Pese al aumento de la recarga neta en este último acuífero, es importante destacar que la sobreexplotación del acuífero sigue siendo un problema a largo plazo. Por esta razón, se continuará evaluando medidas adicionales, propuestas por el PHJ22/27, en los siguientes apartados para garantizar la sostenibilidad del recurso.



**Figura 19.** Variación mensual de la recarga neta del acuífero de la Plana de Castellón (hm<sup>3</sup>) en situación actual sin y con los escenarios de escasez en el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 20.** Variación mensual de la recarga neta del acuífero de Azuébar – Vall d'Uixó ( $hm^3$ ) en situación actual sin y con los escenarios de escasez en el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

En general, la disminución de los suministros superficiales y subterráneos durante los periodos de escasez hídrica tiene como consecuencia el aumento significativo de los déficits en todas las UDA. En esta simulación, cinco de las seis UDA no cumplen con el criterio IPH, en las UDA de los Riegos Tradicionales, Canal Cota 100, Canal Cota 220 y Moncófar no se cumplió el máximo déficit de 10 años consecutivos, y en la UDA de María Cristina se mantiene el incumplimiento para 2 y 10 años (comparado con la garantía en situación actual). En lo que respecta a la UDA de Vall d'Uixó, los máximos déficits aumentan para 1, 2 y 10 años consecutivos, sin embargo, no llegan a superar el límite en cada uno de ellos.

En cuanto a los déficits ponderados según grupos de demandas, la UDA Riegos Tradicionales aumenta el déficit anual de 0.81% a 3.02%, para los riegos mixtos aumenta de 0.26% a 1.28% y para las otras dos UDA aumenta de 1.33% a 2.06%. El considerar los escenarios de escasez en el modelo representa un mayor déficit anual porcentual para la UDA Riegos Tradicionales.

Con respecto a la energía hidroeléctrica producida, la producción promedio anual se redujo mínimamente de 83 a 82.8 GWh. Aunque reducir los suministros a las demandas agrarias puede aumentar el volumen de agua almacenado en los embalses, esto no necesariamente significa que habrá un mayor volumen disponible para las centrales hidroeléctricas. Se debe tener en cuenta que los suministros de los riegos mixtos tienen la prioridad sobre la demanda

de las centrales, es por ello por lo que el aumento de los suministros superficiales de estas UDA, aunado a un mayor volumen embalsado en Arenós y Sichar, perjudica en cierta medida a los volúmenes derivados para cada central y, en consecuencia, a la energía hidroeléctrica producida. En la Tabla 13 se puede observar que las centrales ubicadas aguas abajo tienen una mayor reducción de la energía eléctrica producida.

Central hidroeléctrica	Promedio anual energía producida (GWh)	
	Escenario PHJ	Escenario Base
Cirat	25.97	25.97
Vallat	21.57	21.56
Ribesalbes	21.53	21.49
Colmenar	9.18	9.16
Onda	2.47	2.41
Hidro	1.47	1.43
Villarreal	0.80	0.78

**Tabla 13.** Promedio anual de energía eléctrica producida (GWh) por cada central hidroeléctrica en situación actual sin y con los escenarios de escasez en la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

En base a los resultados de este apartado se puede concluir que **la incorporación de los criterios del PES es de vital importancia para una correcta gestión del sistema, debido a que con ellas se modificaron los suministros a las UDA y aumentaron los máximos déficits hasta el punto de incumplir las garantías.** Este modelo de base sirvió para el análisis de las medidas de gestión propuestas en el PHJ22/27 de forma separada.

## 7. Análisis de las diferentes medidas de gestión del PHJ22/27

Considerando el modelo detallado anteriormente, denominado “Escenario Base”, se incluyeron diferentes medidas propuestas en el PHJ22/27 a fin de determinar el impacto de cada una de ellas sobre el sistema de explotación de forma independiente.

### 7.1. Efecto de las depuradoras

En el apartado “4.4.2. Aportaciones no naturales” se presentaron todas las EDAR a incluir en el modelo de gestión. De ellas se indicó que en situación actual solo la EDAR de Vall d’Uixó regenera el volumen total de agua depurada para suministrarla en el riego. En esta sección se evaluará el efecto de incluir otras EDAR (Moncófar, Almassora, Borriana y Castellón) que regeneren los recursos vertidos para el suministro a las demandas agrícolas. Por esta razón, a este modelo se le denominó como “Escenario Base + Reutilización”.

En el PHJ22/27 se establecieron determinadas reservas sobre los efluentes de las EDAR del sistema de gestión con el propósito de reducir los bombeos en ambas masas de agua subterráneas (Plana de Castellón y Azuébar – Vall d’Uixó).

En primer lugar, para la EDAR de Castellón se mantiene una reserva anual de 12 hm<sup>3</sup> en comparación con el PHJ16/21. Este recurso será suministrado en la UDA Riegos Tradicionales con la finalidad de mejorar la garantía. En el Real Decreto 35/2023 se establece en el artículo 18.C.3 del Anexo XI que estos recursos solo se utilizarán en situaciones de escasez (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023a).

En segundo lugar, para las EDAR de Almassora y Borriana se establecen reservas anuales de 3.3 y 4.7 hm<sup>3</sup>, respectivamente. Sin embargo, se debe tener en cuenta que en el modelo de gestión se han considerado los volúmenes vertidos totales de 2.5 y 4.6 hm<sup>3</sup> detallados anteriormente en la Tabla 4. Los recursos regenerados serán suministrados a la UDA Vall d’Uixó para reducir los bombeos y mejorar el estado cuantitativo del acuífero de Azuébar – Vall d’Uixó.

En tercer lugar, para la EDAR de Moncófar se aumenta la reserva anual de 1 a 1.7 hm<sup>3</sup> comparado con el PHJ16/21. Al igual que el caso anterior el volumen incluido en el modelo fue de 1.5 hm<sup>3</sup> por ser el volumen total depurado en la EDAR de Moncófar. Los recursos

suministrarán a la UDA Moncófar con el fin de sustituir parcialmente los bombeos en el acuífero de Azuébar – Vall d’Uixó.

Aunado a lo anterior se debe tener en cuenta la capacidad máxima de suministro, definidas en el PHJ22/27, que limitarán el suministro a las UDA mencionadas anteriormente. En el modelo se ha considerado estas capacidades anuales en las respectivas tomas o tramos que suministran con recursos de las EDAR a las diferentes UDA. Por ejemplo, en la EDAR de Castellón la reserva de recurso regenerado de 12 hm<sup>3</sup> coincide con la capacidad máxima; en cambio para las EDAR de Almassora y Borriana, la capacidad es de 4 hm<sup>3</sup> en conjunto por lo que este valor se consideró como volumen regenerado. En la Tabla 14 se presenta lo mencionado de forma resumida.

Aportación no natural	Vertido anual (hm <sup>3</sup> )	Reutilización anual (hm <sup>3</sup> )	Modelo (hm <sup>3</sup> )
EDAR Moncófar	1.5	1.3	1.5
EDAR Almassora	2.5	4.0	2.5
EDAR Borriana	4.6		4.6
EDAR Castellón	13.9	12.0	13.9
EDAR Vila-real	3.3	0.0	3.3
EDAR Vall d’Uixó	1.5	1.5	1.5

**Tabla 14.** Volumen anual depurado, reutilizado e incluido en el modelo de gestión (hm<sup>3</sup>) en el “Escenario Base + Reutilización”.

Fuente: Elaboración propia.

Comparando estos datos con la Tabla 4 se puede observar que solo se modifican los volúmenes de reutilización, esto significa que en el modelo solo se limitarán en las tomas o tramos respectivos el caudal circulante a las UDA, mas no se modificarán las aportaciones.

Cabe indicar que se incluye el volumen de vertido en las aportaciones y no el de reutilización debido a que el volumen sobrante servirá para incrementar el caudal fluyente y cumplir con el caudal ecológico del río, específicamente en el tramo bajo del río Mijares.

Para lograr esta medida son necesarias diversas actuaciones detalladas en el PHJ22/27, tales como:

- Actividades relacionadas con la distribución de los recursos regenerados en la EDAR de Castellón para atender las necesidades ambientales en el último tramo del río Mijares.

- Obras de adecuación para las depuradoras de Almassora y Borriana para que sus efluentes puedan ser reutilizados para el riego de Vall d’Uixó y poder sustituir bombeos en los acuíferos de la Plana de Castellón y Azuébar-Vall d’Uixó.
- Obras de adecuación de la EDAR de Moncófar para permitir la reutilización de aguas depuradas para el riego de Moncófar y sustituir los bombeos en el acuífero de la Plana de Castellón.
- Obras para distribuir los recursos regenerados por la EDAR Moncófar y poder suministrar a la UDA Moncófar para sustituir bombeos en el acuífero de la Plana de Castellón.

Tal y como se mencionó anteriormente, según el Real Decreto 35/2023 el uso de los recursos regenerados de la EDAR de Castellón para la UDA Riegos Tradicionales requiere del establecimiento de una regla de operación para regular el aprovechamiento de los recursos (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023a). Por ello, en la Tabla 15 se puede apreciar que se limita la capacidad al 50% en escenario de alerta y al 100% en escenario de emergencia. Esta regla de operación se aplicó en la toma del nudo 53 del modelo que suministra a la UDA Riegos Tradicionales.

UDA	Origen	Porcentaje de la capacidad autorizado			
		Normalidad	Prealerta	Alerta	Emergencia
Riegos tradicionales	Pozos de sequía	0%	0%	50%	75%
	Reutilización EDAR Castellón	0%	0%	50%	100%

**Tabla 15.** Porcentaje de capacidad autorizado de recursos excepcionales permitidas de reutilización y de pozos de sequía en función del escenario de escasez de la zona de estudio.

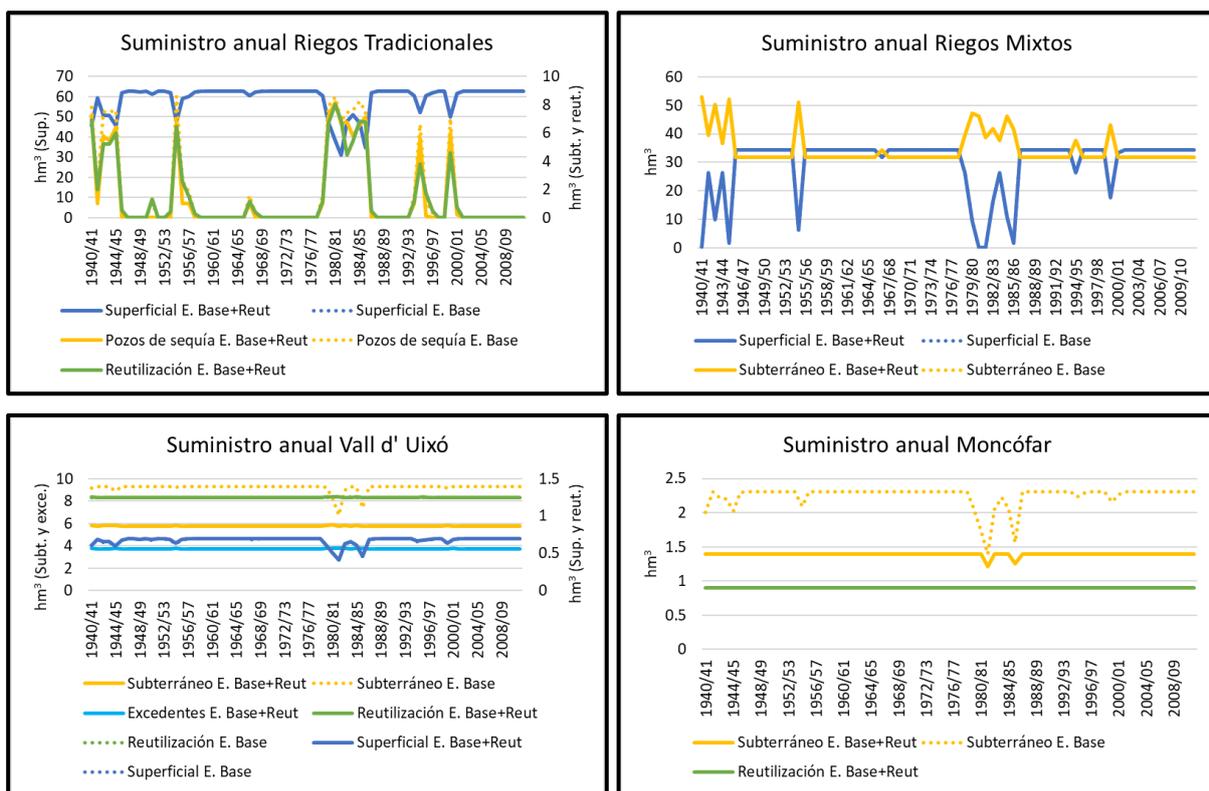
Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022.

Como resultado de la simulación con las nuevas consideraciones se obtuvo, en lo referido a los volúmenes embalsados en Arenós y Sichar, una nula variación de los volúmenes mensuales simulados. El número de llenados y vaciados se mantuvieron en 101 y 0 veces, respectivamente. Esto nos indica que la inclusión de volúmenes regenerados para las UDA Riegos Tradicionales, Vall d’Uixó y Moncófar no genera efectos en los volúmenes embalsados aguas arriba.

Se debe tener en cuenta que, de las tres demandas agrícolas mencionadas, solo la UDA Riegos Tradicionales podría generar modificaciones en la serie simulada de los volúmenes embalsados, sin embargo, el suministro de recursos regenerados de la EDAR de Castellón

durante épocas de escasez ayuda a reducir la cantidad extraída de los pozos de sequía y mejorar la garantía, en lugar de aumentar el almacenamiento de los recursos superficiales. Es por ello que al analizar los resultados se observó una reducción del volumen promedio anual bombeado, en comparación con el “Escenario Base”, de 1.71 a 1.36 hm<sup>3</sup>. Además, se apreció que el volumen de recursos regenerados fue de 1.38 hm<sup>3</sup>, como es mayor al volumen que suple el recurso subterráneo significa que suministro adicional es para mejorar la garantía.

Dado que las medidas benefician principalmente a las demandas agrícolas de los Riegos Tradicionales, Vall d’Uixó y Moncófar, es de esperar que el caudal bombeado se reduzca solo en estas demandas. De la simulación se obtuvo que los volúmenes promedios anuales bombeados se redujeron solo en las demandas mencionadas, en 0.35, 3.44 y 0.86 hm<sup>3</sup>, respectivamente (Figura 21). Esto significa que en el acuífero de Azuébar – Vall d’Uixó se redujeron en mayor medida los bombeos promedio anuales, de 11.45 a 7.15 hm<sup>3</sup>.



**Figura 21.** Suministro a las demandas agrícolas (hm<sup>3</sup>) en “Escenario Base” y “Escenario Base + Reutilización” en la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

En lo que respecta a los suministros de los riegos mixtos, no se presenta variación alguna de los caudales mensuales por la implementación de la presente medida. Esto se debe a que los

caudales mensuales del Mijares a lo largo del cauce no varían en comparación con el “Escenario Base”, y a su vez se debe a dos razones:

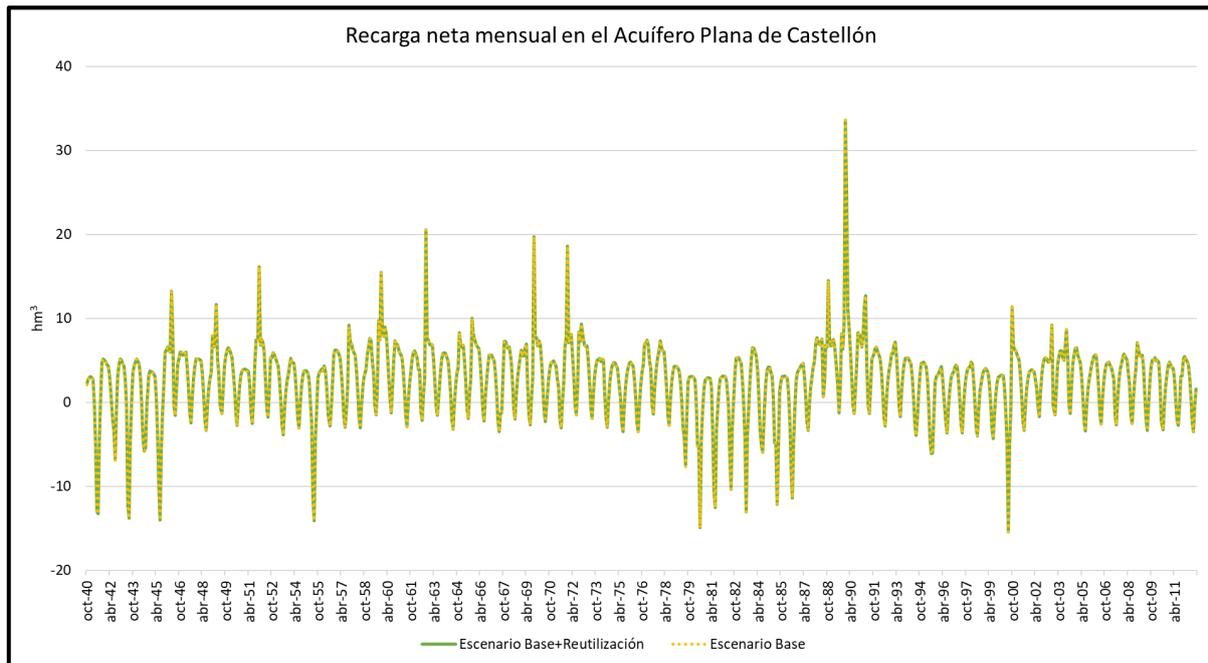
- El suministro de recursos regenerados en la UDA Riegos Tradicionales se da en la parte baja de la cuenca y solo afecta en el bombeo, tal y como se detalló anteriormente.
- El modelo del presente apartado mantiene desconectada la gestión de las UDA de Vall d’Uixó y Moncófar de las otras demandas agrícolas, es decir, no hay recursos del río Mijares que se deriven para las dos demandas que puedan afectar a la distribución.

Cabe indicar que en la UDA de Vall d’Uixó se presenta un suministro de excedentes, que hace referencia a una toma que aporta tanto recursos regenerados de las EDAR Almassora y Borriana como recursos derivados del río Mijares. Este último se evaluará en un próximo apartado y no es considerado para el presente escenario. Por lo tanto, en la Figura 21 los suministros “Reutilización” y “Excedentes” representan recursos regenerados de las EDAR Vall d’Uixó, Almassora y Borriana; el volumen promedio anual de estos suministros es de  $5.04 \text{ hm}^3$ , que representa el 43.8%.

Respecto a la recarga neta en ambos acuíferos, comparando con el “Escenario Base”, se produce un ligero aumento del promedio de la recarga neta mensual en el acuífero de la Plana de Castellón de  $2.68$  a  $2.7 \text{ hm}^3$  (Figura 19), y para el acuífero de Azuébar – Vall d’Uixó un aumento de  $-0.74$  a  $-0.39 \text{ hm}^3$  (Figura 20).

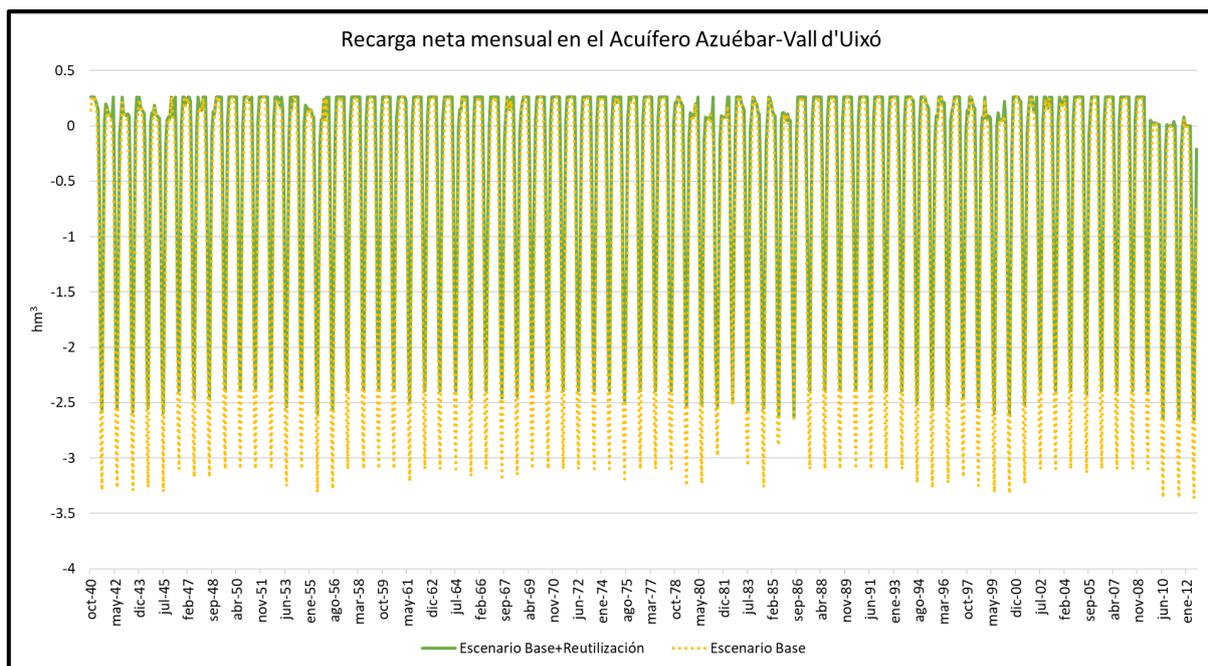
Como resultado del suministro de agua regenerada, las UDA Riegos Tradicionales, Vall d’Uixó y Moncófar cumplen el criterio IPH; en el “Escenario Base” solo la UDA Vall d’Uixó la cumplía.

En los déficits anuales ponderados de los grupos de interés solo se reducen UDA Riegos Tradicionales de 3.02% a 1.36% y el grupo de UDA Vall d’Uixó y Moncófar de 2.06% a 0.04%. Este último grupo es el más beneficiado, pues logra reducir en mayor medida su déficit anual porcentual.



**Figura 22.** Variación mensual de la recarga neta del acuífero de la Plana de Castellón ( $hm^3$ ) del “Escenario Base” y “Escenario Base + Reutilización” en el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 23.** Variación mensual de la recarga neta del acuífero de Azuébar – Vall d'Uixó ( $hm^3$ ) del “Escenario Base” y “Escenario Base + Reutilización” en el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Por último, en la energía eléctrica producida tampoco se evidencia variación alguna. Esto va acorde con la nula variación en los caudales mensuales a lo largo del río Mijares antes de la desembocadura. Al mantenerse la distribución de los recursos y los volúmenes embalsados

en Arenós y Sichar, la energía eléctrica producida por las centrales hidroeléctrica es la misma en ambos escenarios.

## 7.2. Efecto de la desalinizadora

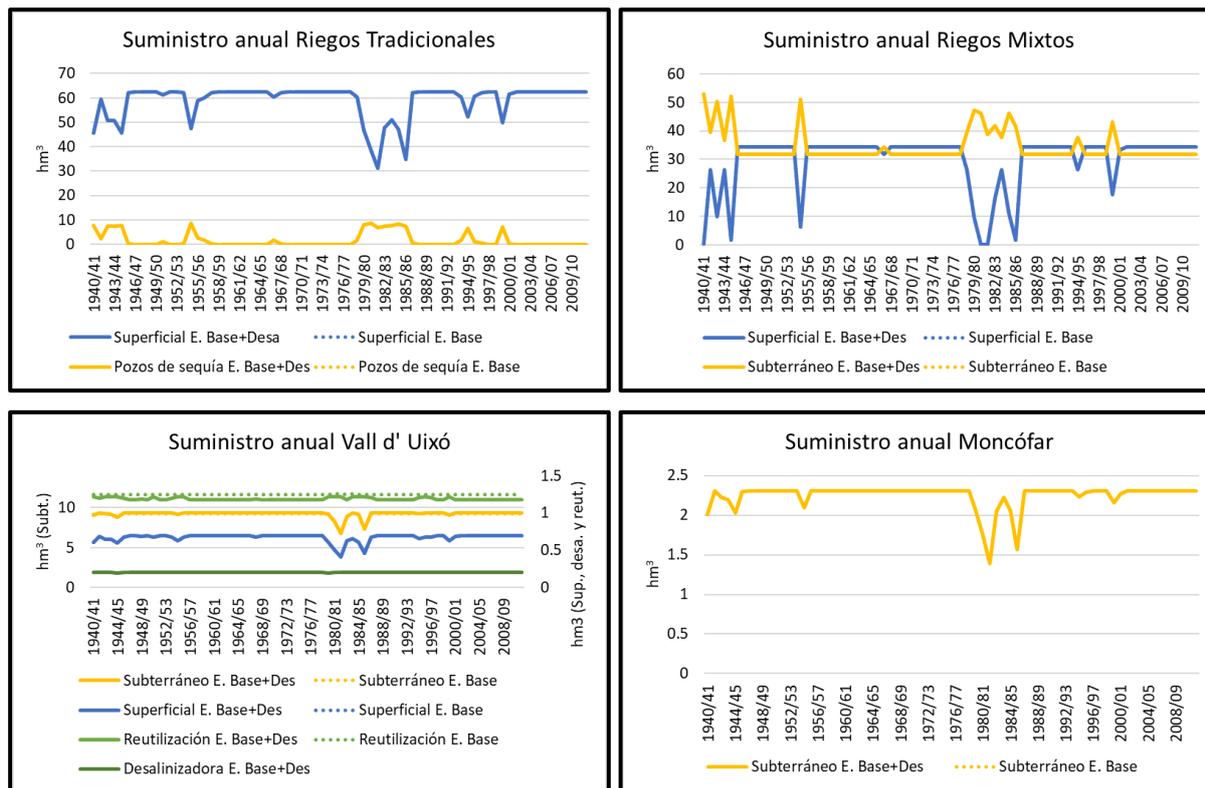
Sobre el modelo de gestión del apartado “6. Análisis de la situación actual con restricciones del Plan Especial de Sequía” se incluyó la Instalación Desaladora de Agua de Mar (IDAM) de Moncófar para la sustitución de bombeos en la UDA Vall d’Uixó y para la mejora del estado cuantitativo de la masa de agua subterránea de Azuébar – Vall d’Uixó. El RD35/2023 precisa en el artículo 18.C.2.b.V del Anexo XI que se prevé una reserva anual de  $0.5 \text{ hm}^3$  para la UDA en cuestión, de los cuales  $0.2 \text{ hm}^3$  serán para sustituir bombeos y  $0.3 \text{ hm}^3$  para completar los usos actuales hasta el límite máximo de los derechos de aguas subterráneas en la UDA (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023a).

Al igual que el escenario anterior, se debe tener en cuenta que en el PHJ22/27 se especifica una capacidad máxima de suministro de  $0.2 \text{ hm}^3$  acorde con la reserva prevista para la reducción de bombeos, es por ello que se asumió una aportación anual del mismo valor.

Para diferenciar los resultados del modelo de gestión del presente apartado se denominó como “Escenario Base + Desalinizadora”.

De los resultados de la simulación se obtuvo, en lo referido a los volúmenes embalsados en Arenós y Sichar, una variación nula de los volúmenes mensuales. El número de llenados y vaciados se mantienen en 101 y 0 veces, respectivamente. Al igual que el “Escenario Base + Reutilización” la inclusión de la aportación de la IDAM de Moncófar no genera modificaciones en los volúmenes embalsados.

En relación con los suministros a las UDA, se puede apreciar en la Figura 24 que la medida implementada solo beneficia a la UDA Vall d’Uixó. En comparación con los resultados del “Escenario Base”, la aportación de la desalinizadora reduce principalmente el suministro promedio anual de la EDAR Vall d’Uixó de  $1.28$  a  $1.24 \text{ hm}^3$  y el suministro subterráneo de  $9.21$  a  $9.2 \text{ hm}^3$ .



**Figura 24.** Suministro a las demandas agrícolas ( $hm^3$ ) en “Escenario Base” y “Escenario Base + Desalinización” en la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

En cuanto a las garantías, el criterio IPH se sigue cumpliendo para la UDA Vall d’Uixó; en el caso de las demás demandas no se genera cambio alguno, es decir, se mantiene el incumplimiento del criterio. Es por ello que de los déficits ponderados anuales solo se reduce el grupo de la UDA Vall d’Uixó y Moncófar de 2.06% a 1.29%.

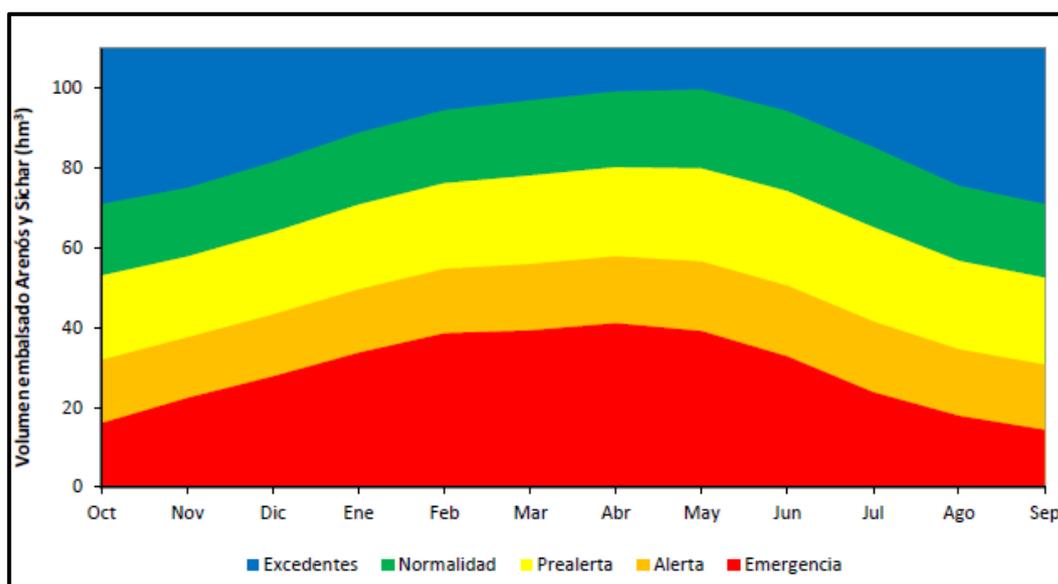
En relación con la energía eléctrica producida, tampoco se observa variación alguna. Esto nos indica que la influencia de la desalinizadora en el sistema de explotación es mínima y no genera un impacto significativo.

### 7.3. Efecto de la Balsa de Belcaire

En este apartado se configuró el modelo de gestión de tal forma que se derive parte de los recursos superficiales del río Mijares hacia la Balsa del Belcaire para el suministro en las UDA de Vall d’Uixó y Moncófar, en los modelos anteriores estos tramos estaban bloqueados. A este modelo se le denominó como “Escenario Base + Balsa”.

Los datos físicos, volúmenes, cotas y tasa de evaporación de la balsa fueron configurados previamente en el apartado “4.4.3. Embalses”.

Esta medida requiere el establecimiento de nuevas reglas de operación que permitan la explotación de los recursos del río Mijares sin comprometer las garantías ni los suministros de las otras UDA (riegos tradicionales y mixtos). En el PHJ22/27 se define una regla de operación para determinar el volumen sobrante en el Mijares, en base a los volúmenes embalsados en Arenós y Sichar, que puede ser suministrado para las UDA Vall d’Uixó y Moncófar. En la Figura 25 se presenta la curva de excedentes junto a las curvas de los escenarios de escasez. La regla de operación se introdujo en el tramo entre la Balsa de Belcaire y el nudo 47 en la Figura 16.



**Figura 25.** Curvas de volúmenes embalsados en Arenós y Sichar obtenidas para estimar el escenario de escasez y excedentes en la zona de estudio.

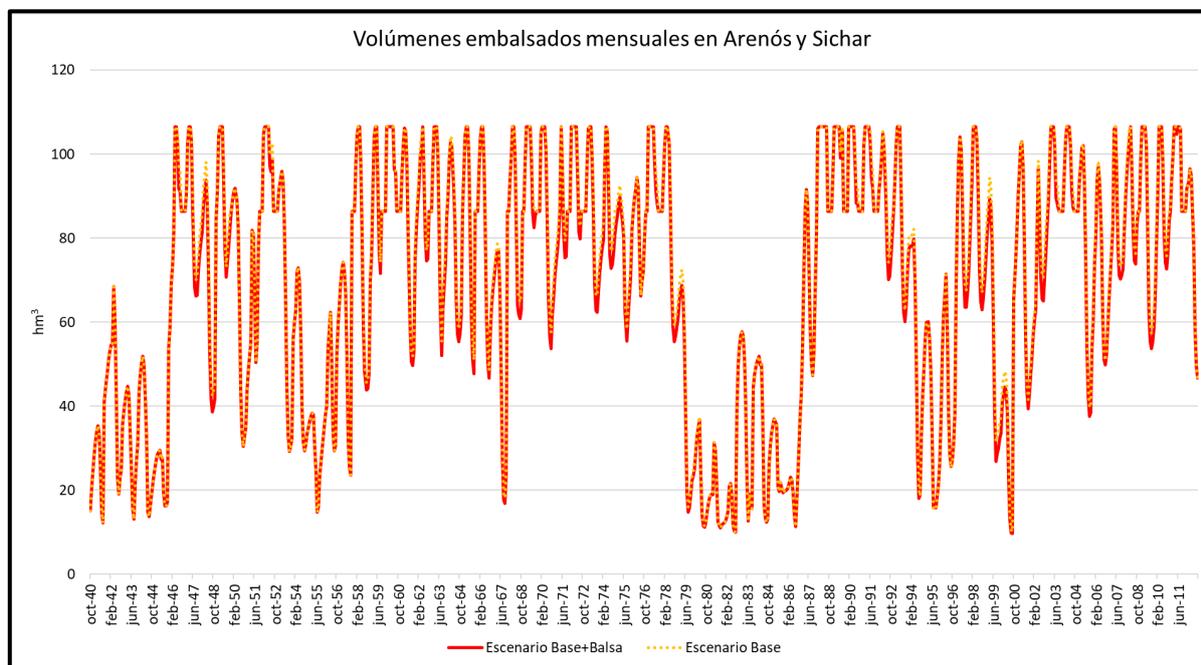
Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022.

Asimismo, en el artículo 18.C.4.c del Anexo XI del Real Decreto 35/2023 se establece una reserva anual de 7 hm<sup>3</sup> procedente del río Mijares para el suministro a las UDA Vall d’Uixó y Moncófar en conjunto. Esta medida tiene la finalidad de reducir los bombeos en estas zonas agrícolas y mejorar el estado cuantitativo del acuífero de Azuébar – Vall d’Uixó.

Cabe resaltar que en el modelo se consideró un escenario optimista o de máximo aprovechamiento donde además de utilizar los recursos superficiales del río Mijares adicionalmente se aprovecharán los obtenidos del río Belcaire, los cuales inicialmente eran para infiltrarlos en el acuífero de Azuébar – Vall d’Uixó. Los recursos superficiales sobrantes (que no sea suministrado o almacenado en la balsa) servirán para infiltrar en el acuífero.

El considerar la función de regulación para riego en la Balsa de Belcaire generó diversos efectos en el sistema de gestión en comparación con el “Escenario Base”. En lo que respecta

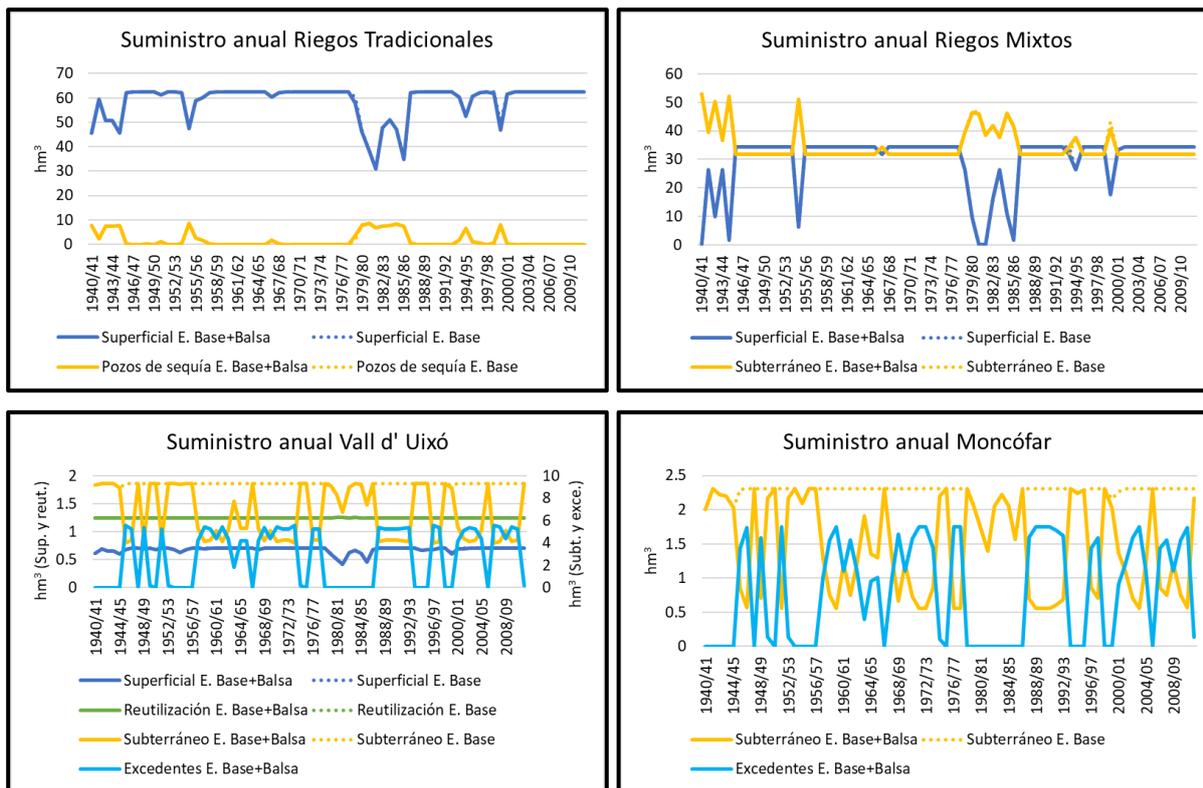
a los volúmenes embalsados en Arenós y Sichar, generó un ligero descenso en los volúmenes, el número de llenados se redujo de 101 a 99 veces, el número de vaciados se mantuvo en 0, sin embargo, el volumen mínimo registrado se redujo de 9.93 a 9.63 hm<sup>3</sup>.



**Figura 26.** Simulación mensual de los volúmenes embalsados en Arenós y Sichar (hm<sup>3</sup>) en “Escenario Base” y “Escenario Base + Balsa” el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

En relación con los suministros a las UDA, los principales cambios se dan en los suministros de las UDA Vall d’Uixó y Moncófar (Figura 27). En lo que respecta a los volúmenes bombeados, al contar con un menor volumen del recurso superficial del río Mijares es de esperar que el volumen promedio anual de bombeo para la UDA Riegos Tradicionales aumente por tratarse de pozos de sequía, aumentando de 1.71 a 1.75 hm<sup>3</sup>, mientras que en las UDA de los riegos mixtos el suministro subterráneo se mantiene igual y el suministro superficial se reduce de 29.62 a 29.58 hm<sup>3</sup>. El impacto en las UDA de los riegos mixtos y tradicionales es mínimo, debido a la regla de operación que deriva solo los excedentes del río Mijares y a que las demandas de las UDA Vall d’Uixó y Moncófar son muy inferiores a las de los riegos mixtos y tradicionales.

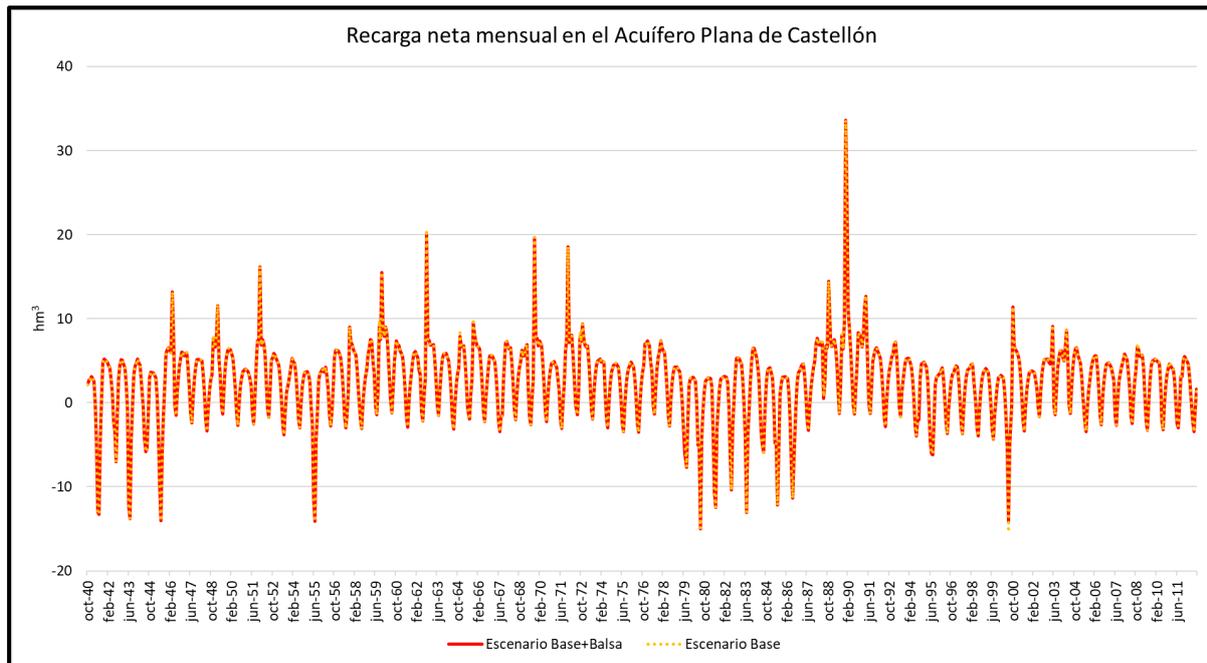


**Figura 27.** Suministro a las demandas agrícolas ( $\text{hm}^3$ ) en “Escenario Base” y “Escenario Base + Balsa” en la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

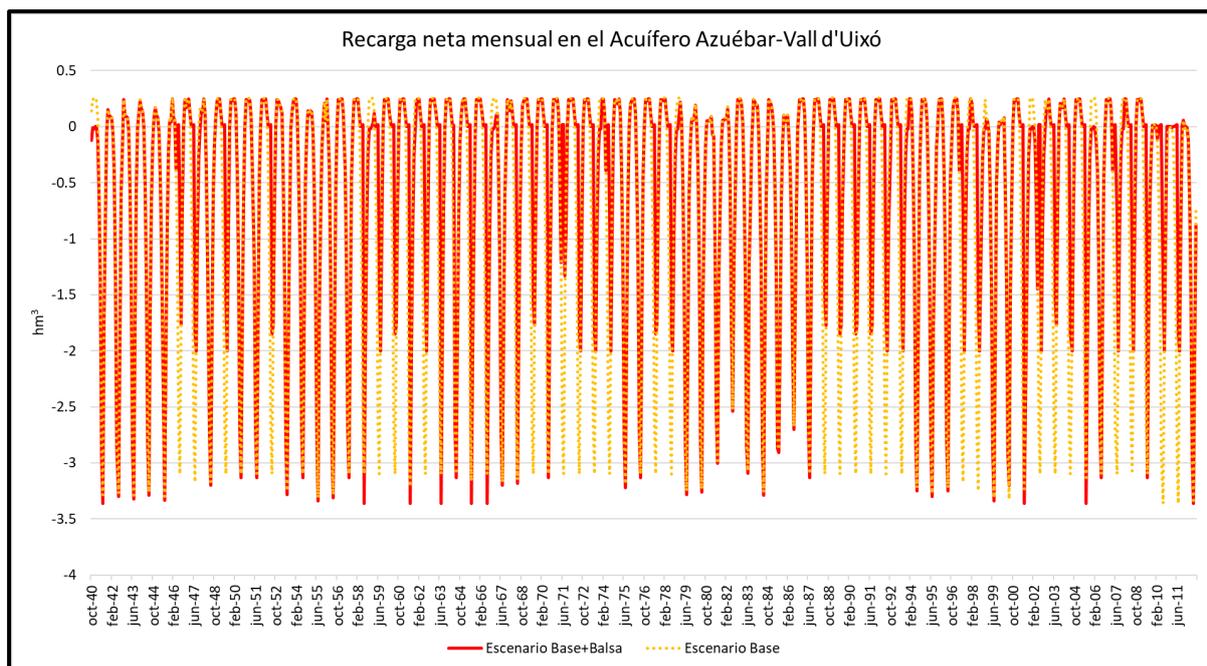
En los suministros de la UDA Vall d’Uixó solo se observaron variaciones en el suministro subterráneo, los bombeos promedio anuales se vieron reducidos de 9.21 a 6.55  $\text{hm}^3$ . De igual forma, en la UDA Moncófar los excedentes superficiales del río Mijares reducen los bombeos promedio anuales de 2.24 a 1.43  $\text{hm}^3$ . En conjunto generan una reducción del bombeo promedio anual en el acuífero de Azuébar – Vall d’Uixó de 11.45 a 7.98  $\text{hm}^3$ .

Analizando la recarga neta promedio mensual en los acuíferos, se observó una disminución en el acuífero Plana de Castellón de 2.67 a 2.65  $\text{hm}^3$  y, un aumento en el acuífero Azuébar – Vall d’Uixó de -0.74 a -0.54  $\text{hm}^3$ . En el primer caso es de esperar que la recarga se vea reducida, debido a que parte del recurso superficial disponible se deriva a otra zona de riego. En el segundo caso el aumento de la recarga es significativo, pero la medida de incluir suministros con recursos regenerados de las EDAR genera un mayor aumento.



**Figura 28.** Variación mensual de la recarga neta del acuífero de la Plana de Castellón ( $hm^3$ ) del “Escenario Base” y “Escenario Base + Balsa” en el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 29.** Variación mensual de la recarga neta del acuífero de Azuébar – Vall d'Uixó ( $hm^3$ ) del “Escenario Base” y “Escenario Base + Balsa” el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Otro resultado relevante es que la derivación de recursos del Mijares a las demandas agrícolas en cuestión no genera cambios en el cumplimiento de las garantías mediante el criterio IPH, cinco de las seis demandas agrícolas no cumplen el criterio. La UDA Vall d'Uixó es la única que

lo cumple, mientras que la UDA Moncófar, que es también beneficiaria de la medida, mantiene el número de fallos en 5 veces.

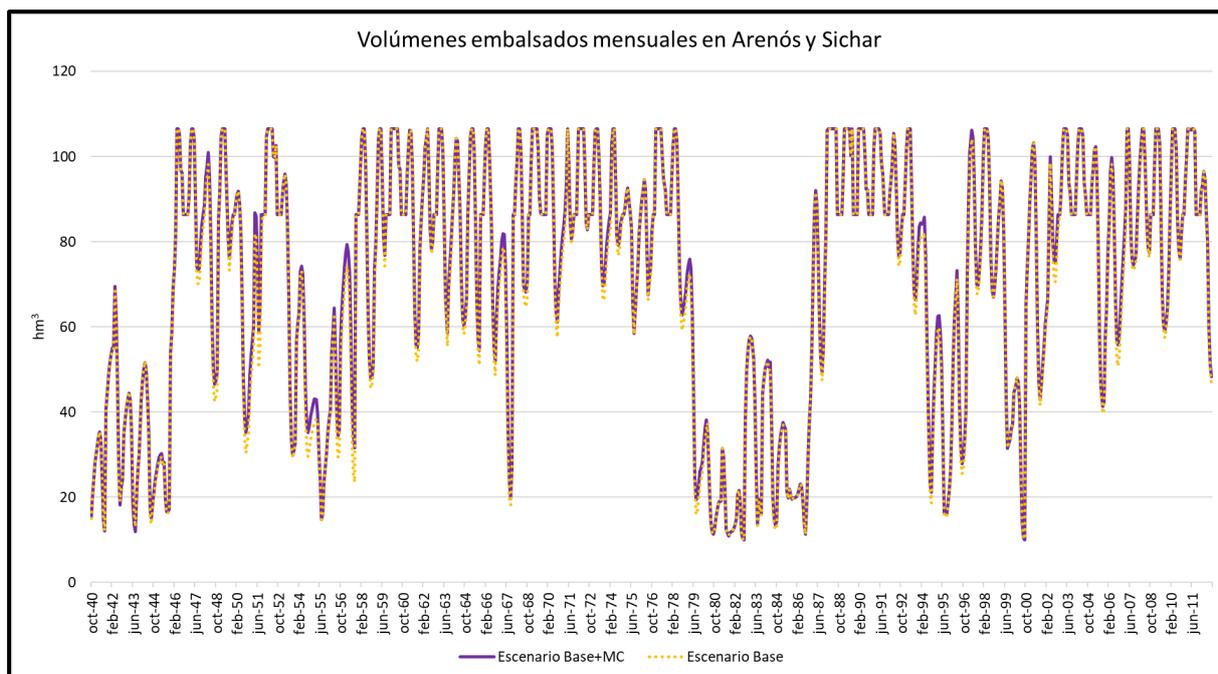
Aunado a ello, el empeoramiento de las garantías de las demandas que se abastecen directamente del río Mijares no es tan significativo, los números de fallo se mantienen y los máximos déficits aumentan ligeramente para 1 año hasta 0.03%, para 2 años hasta 0.54% y para 10 años consecutivos hasta 3.24%. Analizando los déficits ponderados anuales por grupos de interés se obtuvo que para la UDA Riegos Tradicionales aumentó de 3.02% a 3.11%, para los riegos mixtos aumentó de 1.28% a 1.32% y para las UDA de Vall d'Uixó y Moncófar se redujo de 2.06% a 1.3%.

Por último, la energía eléctrica producida se ve afectada de igual forma por la reducción del recurso superficial en el río Mijares, sin embargo, como la simulación de los embalses y suministros de las UDA de los riegos tradicionales y mixtos varía mínimamente, solo se generó una reducción de la energía hidroeléctrica promedio anual de 82.8 a 82.77 GWh.

#### 7.4. Efecto del embalse de María Cristina

En este apartado se evaluaron los efectos de incluir recursos del embalse de María Cristina para el suministro en la UDA María Cristina, al modelo se le denominó "Escenario Base + MC". Pese a que esta no es una medida como tal propuesta en el PHJ22/27, se consideró conveniente realizar una evaluación individual debido a que se trata de un suministro adicional para la UDA María Cristina. En el Real Decreto 35/2023 se establece en el artículo 18.B.4.b.III del Anexo XI la asignación de un volumen anual de hasta 17.1 hm<sup>3</sup> procedentes del embalse en cuestión (Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, 2023a).

Como resultado de la simulación se obtuvo, en relación con los volúmenes embalsados por Arenós y Sichar, que el número de llenados aumenta de 101 a 102 veces, comparando con el "Escenario Base". El número de vaciados y el volumen mínimo promedio anual se mantuvieron en 0 veces y 9.93 hm<sup>3</sup>, respectivamente. Asimismo, de la Figura 30 se obtuvo un aumento en los volúmenes embalsados promedio anual de 840.51 a 853.18 hm<sup>3</sup>.



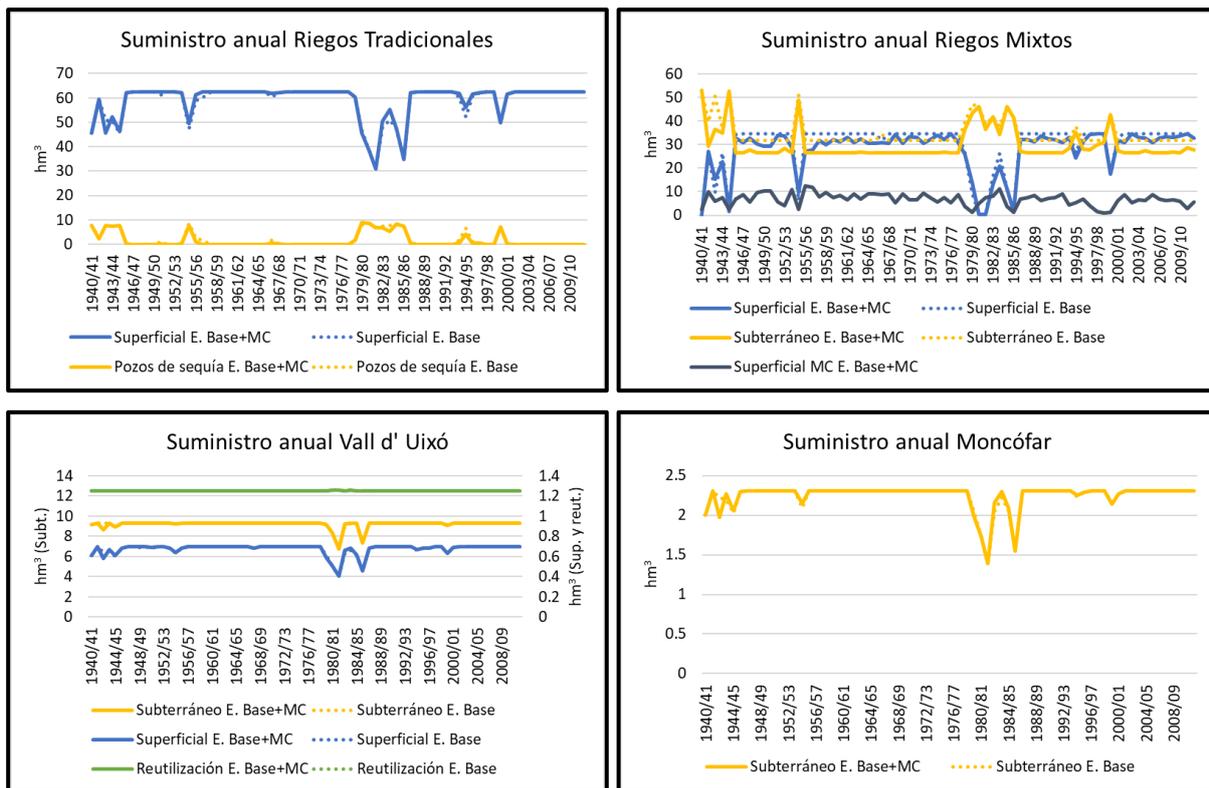
**Figura 30.** Simulación mensual de los volúmenes embalsados en Arenós y Sichar ( $\text{hm}^3$ ) en “Escenario Base” y “Escenario Base + MC” el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

El contar con mayores recursos superficiales en la cuenca del río Mijares, con aportaciones de la Rambla de la Viuda, afecta principalmente al suministro a los riegos mixtos y específicamente a la UDA María Cristina (Figura 32). En la UDA Riegos Tradicionales las variaciones del suministro superficial y subterráneo son mínimas en comparación con el “Escenario Base”, el bombeo promedio anual se reduce de 1.71 a 1.53  $\text{hm}^3$ .

En los riegos mixtos los suministros superficiales (sin considerar los recursos del embalse de María Cristina) y subterráneos se ven reducidos de 29.65 a 27.76  $\text{hm}^3$  y de 34.45 a 30.07  $\text{hm}^3$ , respectivamente. Como es de esperar las principales reducciones se dan en la UDA María Cristina, recursos superficiales del Mijares de 6.37 a 4.21  $\text{hm}^3$  y recursos subterráneos de 5.53 a 1.19  $\text{hm}^3$ , cabe indicar que el suministro promedio anual proveniente del embalse de María Cristina asciende a 6.74  $\text{hm}^3$ .

Por otro lado, pese a que en este escenario no se deriven recursos del río Mijares a las demandas agrícolas de Vall d’Uixó y Moncófar, éstas se ven afectadas por la regla de operación sobre los embalses acumulados en Arenós y Sichar. Dado que la variación de los volúmenes acumulados en los embalses es mínima la variación en el suministro a estas UDA es irrelevante (solo varía 0.01  $\text{hm}^3$  el suministro subterráneo promedio anual en la UDA Vall d’Uixó).

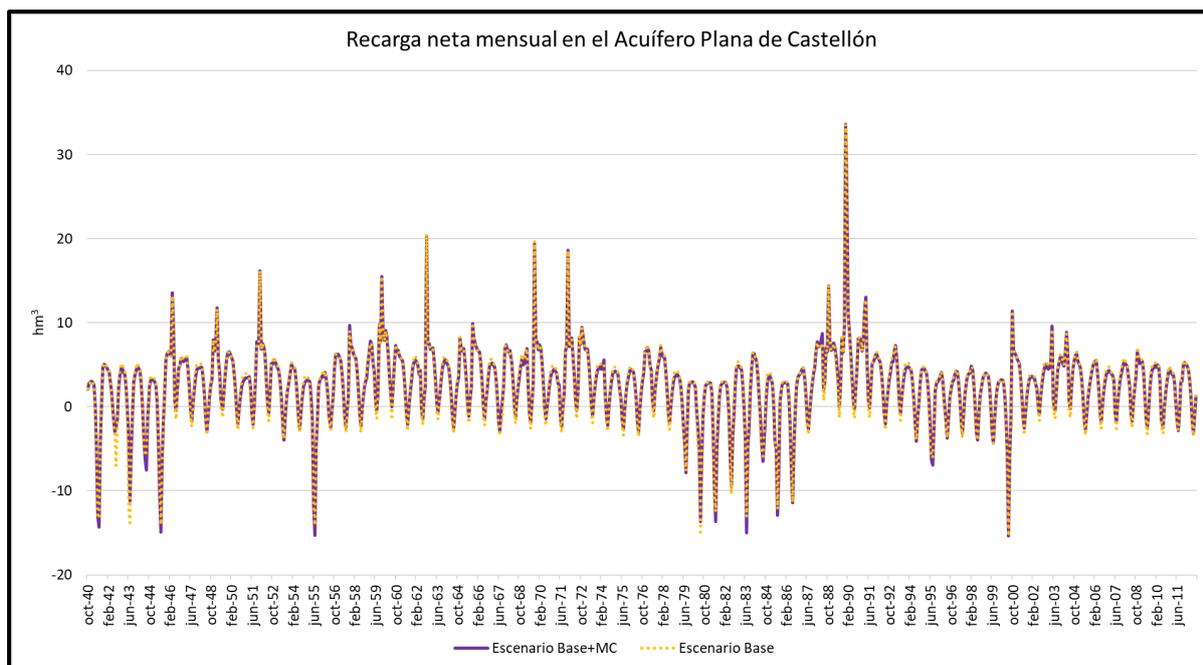


**Figura 31.** Suministro a las demandas agrícolas ( $\text{hm}^3$ ) en “Escenario Base” y “Escenario Base + MC” en la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

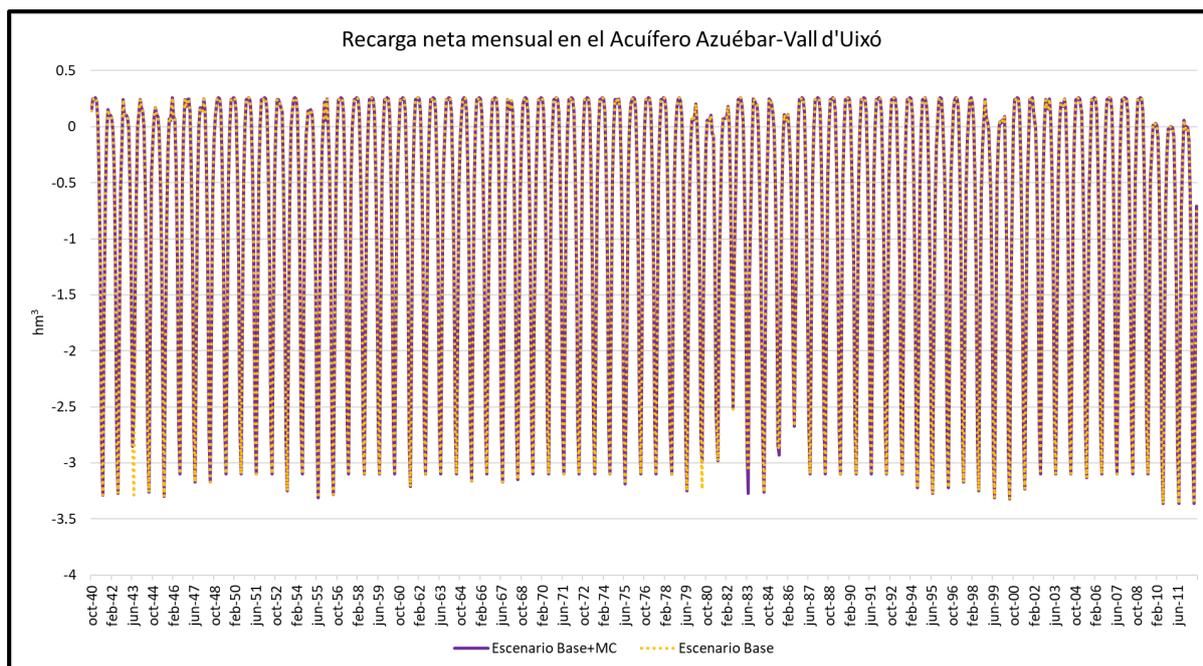
Es coherente que el bombeo de la UDA María Cristina sea la que más se vea reducida, debido a que es la demanda que se beneficia directamente por los recursos del embalse de María Cristina. Las otras demandas agrícolas de los riegos mixtos son beneficiadas indirectamente por reducir el suministro superficial a la demanda de María Cristina con recursos del río Mijares, pudiendo así aumentar el suministro superficial de las otras demandas. Entre las demandas que se benefician indirectamente, la que reduce en menor medida el caudal bombeado es la UDA Cota 220 y es debido a que se encuentra aguas arriba de la medida aplicada, a diferencia de la UDA Cota 100 que comparte recursos del tramo común y la UDA Riegos Tradicionales ubicada aguas abajo.

Analizando la recarga neta mensual en ambos acuíferos, se observó un aumento mínimo en el acuífero de la Plana de Castellón de  $2.68$  a  $2.69 \text{ hm}^3$ , mientras que en el acuífero de Azuébar – Vall d’Uixó la recarga se mantuvo invariable.



**Figura 32.** Variación mensual de la recarga neta del acuífero de la Plana de Castellón ( $hm^3$ ) del “Escenario Base” y “Escenario Base + MC” en el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 33.** Variación mensual de la recarga neta del acuífero de Azuébar – Vall d’Uixó ( $hm^3$ ) del “Escenario Base” y “Escenario Base + MC” el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Respecto a las garantías, en comparación del “Escenario Base”, con esta medida se logra reducir el número de demandas agrícolas que no cumplen con el criterio IPH de cinco a cuatro; adicional a la UDA Vall d’Uixó, la UDA María Cristina cumple con el criterio. La UDA María

Cristina reduce los máximos déficits para 1, 2 y 10 años consecutivos de 46.55, 93.08 y 218.74 a 34.94, 37.13 y 62.28, respectivamente. En cuanto a las cuatro UDA que no cumplen con el criterio reducen el número de fallos entre 0 y 1.

En cuanto a los déficits ponderados anuales de los grupos de interés, en la UDA Riegos Tradicionales disminuye de 3.02% a 2.91%, en los riegos mixtos disminuye de 1.28% a 1.13% y en las otras dos UDA aumenta de 2.06% a 2.1%. Esta medida trae mayores beneficios para las demandas de los dos primeros grupos de interés.

Por último, en lo que respecta a la energía eléctrica producida, el promedio anual se ve reducido mínimamente de 82.8 a 82.78 GWh. Esto va en contra de lo que se pensaría que al contar con mayores recursos en el río Mijares se podría derivar un mayor volumen a las centrales hidroeléctricas produciendo así una mayor energía eléctrica, sin embargo, como la variación de los suministros superficiales es mínima en la cuenca media del río Mijares los suministros a las centrales hidroeléctricas varían mínimamente. La reducción es debida a las reglas de operación derivadas del PES, que al contar con mayores volúmenes embalsados y por ende menos periodos de escasez, se restringe en menor medida los suministros superficiales (UDA María Cristina, Cota 220 y Cota 100), lo cual significa menores recursos disponibles para derivar a las centrales.

## 8. Análisis de la situación actual con restricciones del PES y medidas propuestas

En este apartado se analizaron las medidas descritas anteriormente sobre el “Escenario Base”, entre ellas están la reutilización de agua regenerada proveniente de las EDAR, la desalación de agua de mar proveniente de la IDAM Moncófar, la derivación de recursos superficiales del río Mijares para el suministro en las UDA Vall d’Uixó y Moncófar, y el suministro superficial de la UDA María Cristina con recursos del embalse de María Cristina. Al presente modelo se le denominó “Escenario Base + Medidas”.

A modo de resumen, en la Figura 34 se presenta la asignación actualizada de todas las reglas de operación mencionadas en los apartados anteriores. Las nuevas reglas de operación obtenidas de las medidas evaluadas son “Curva excedentes” y “Reut\_tradicionales”.

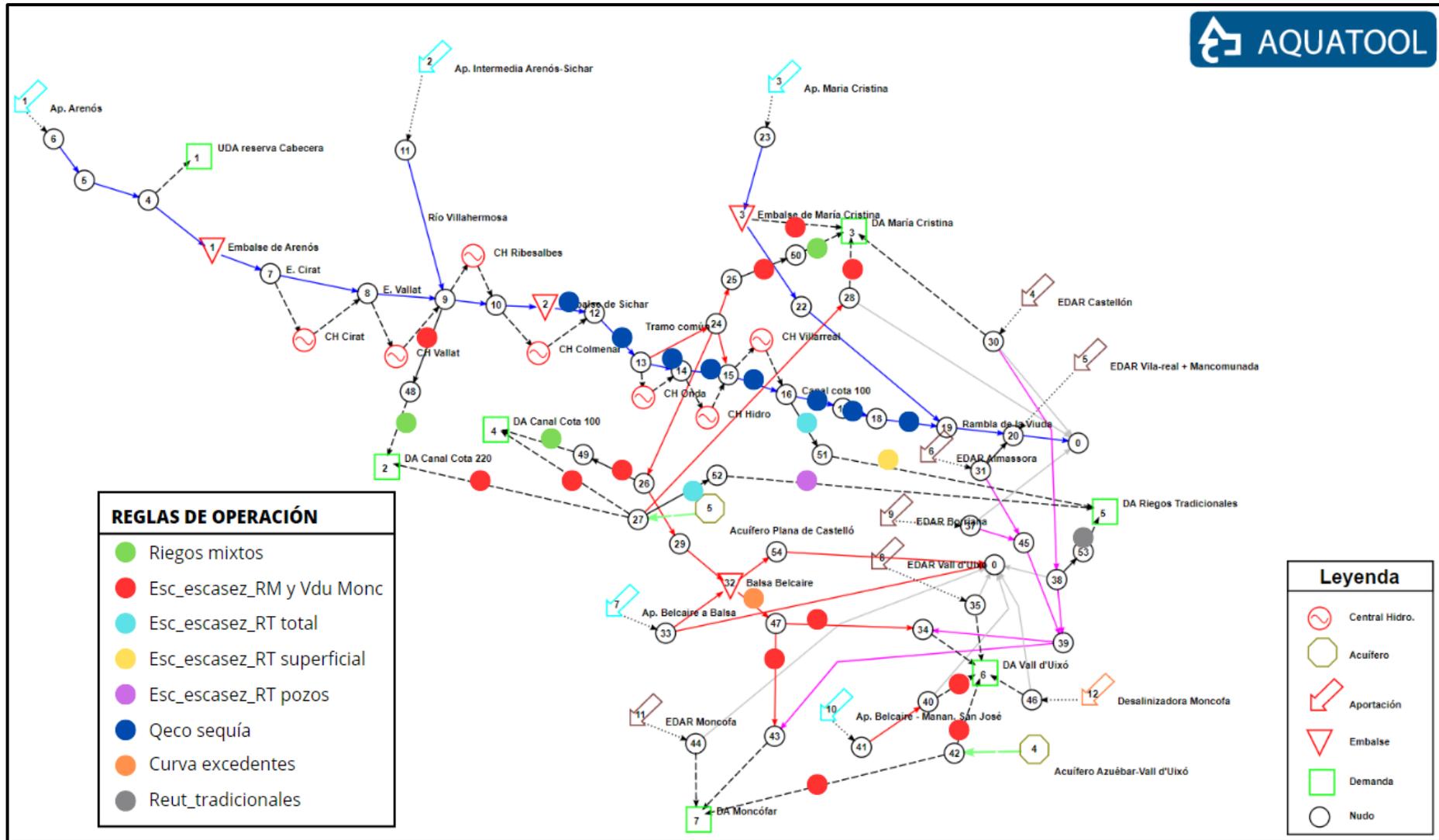
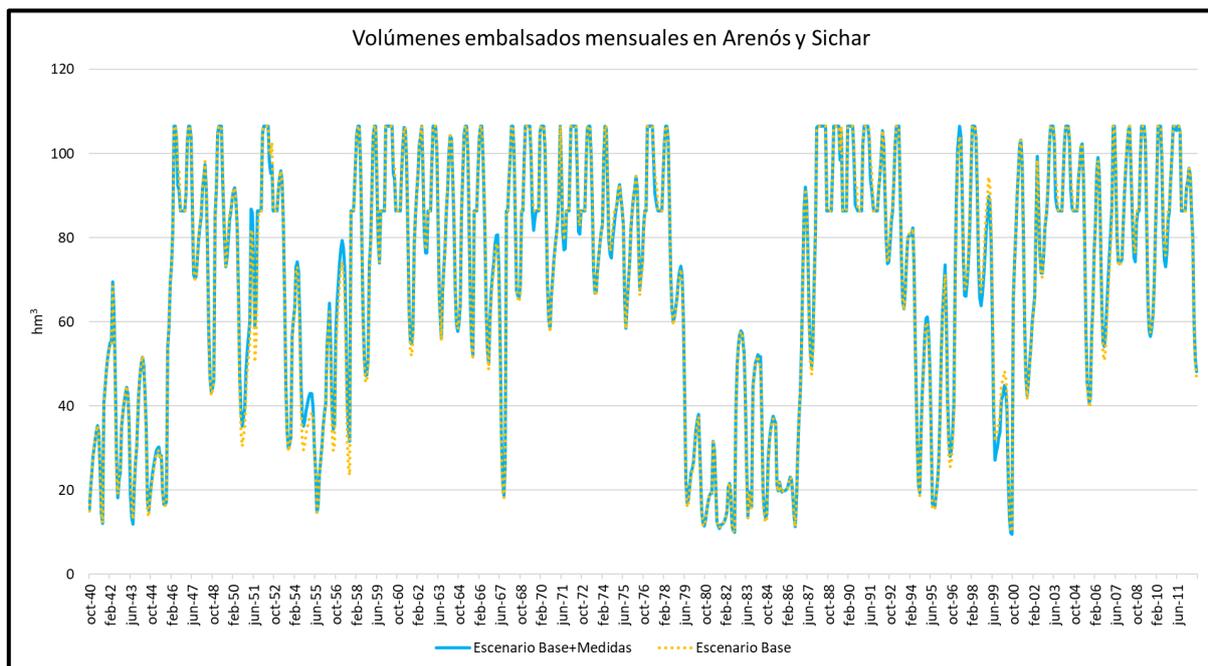


Figura 34. Esquema topológico en SIMGES de la zona de estudio con las reglas de operación previas y nuevas.

Fuente: Elaboración propia.

De los resultados de la simulación y comparándolos con los del “Escenario Base”, en cuanto a los volúmenes embalsados en Arenós y Sichar, el número de llenados se reduce de 101 a 100 veces, el número de vaciados se mantiene en 0 veces y el volumen mínimo registrado de 9.93 a 9.59 hm<sup>3</sup>. La reducción del número de llenados es menor que en el “Escenario Base + MC” y mayor que el “Escenario + Balsa”, esto significa que las medidas en conjunto permiten una reducción mínima en este parámetro. Respecto al volumen mínimo registrado en la simulación la reducción se debe principalmente a la medida que incluye derivar recursos superficiales del Mijares a través de la Balsa de Belcaire.



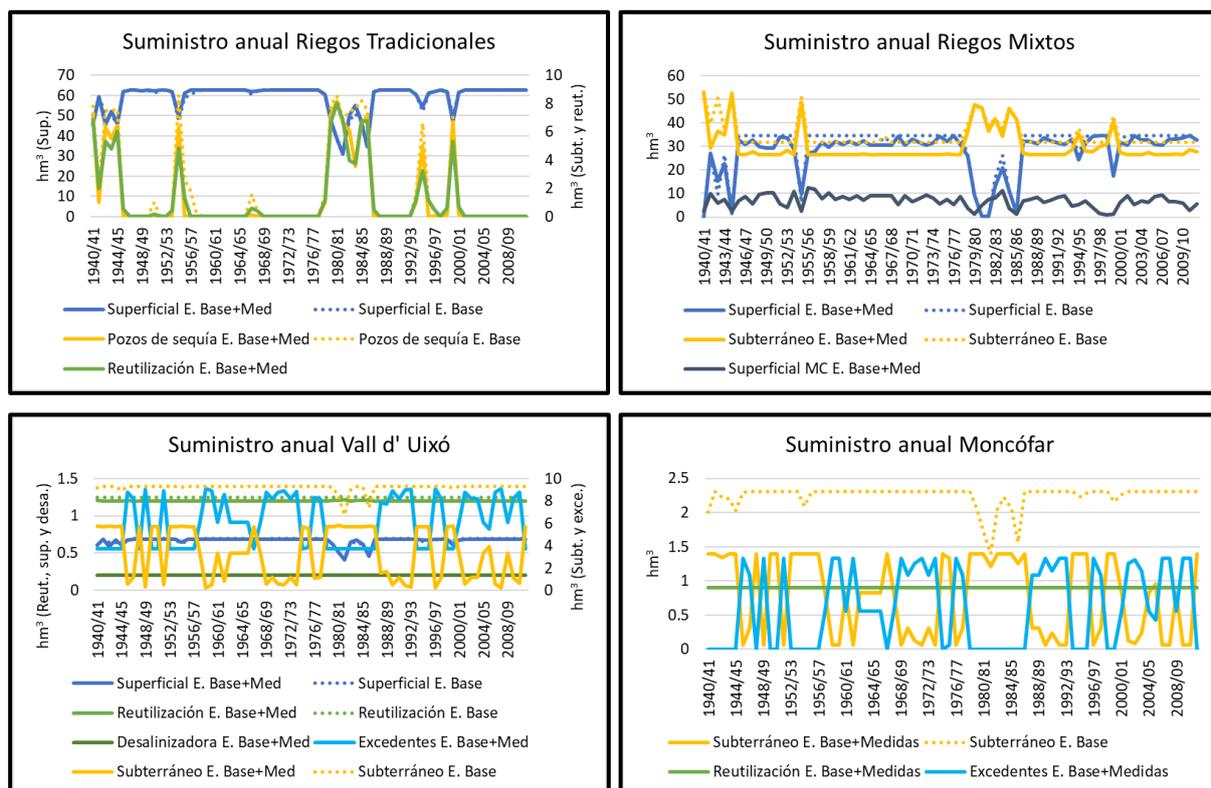
**Figura 35.** Simulación mensual de los volúmenes embalsados en Arenós y Sichar (hm<sup>3</sup>) en “Escenario Base” y “Escenario Base + Medidas” en el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

En general las medidas permiten disponer de mayores recursos superficiales, los cuales tienen como consecuencia directa la disminución de los bombeos en las demandas agrícolas y en mayor medida en el acuífero Azuébar – Vall d’Uixó.

En la UDA Riegos Tradicionales, el suministro superficial se mantiene igual y el suministro subterráneo disminuye, el bombeo promedio anual disminuye de 1.71 a 1.29 hm<sup>3</sup> (Figura 36). Se debe tener en cuenta que, pese a que recursos del río Mijares se derivan por la Balsa de Belcaire, el incluir recursos del embalse de María Cristina y recursos regenerados de la EDAR de Castellón permiten disminuir el bombeo en esta demanda.

Respecto al suministro superficial de los riegos mixtos, la que presenta una mayor reducción en el suministro superficial promedio anual es la UDA María Cristina de 6.37 a 4.09 hm<sup>3</sup>. Se debe tener en cuenta que el suministro superficial para esta demanda solo toma los recursos provenientes del río Mijares. Este resultado es en consecuencia de la medida de utilizar recursos del embalse de María Cristina (“Escenario Base + MC”), e incluso las reducciones son similares. Esto indica que la influencia de las otras medidas sobre este punto no es muy significativa.



**Figura 36.** Suministro a las demandas agrícolas (hm<sup>3</sup>) en “Escenario Base” y “Escenario Base + Medidas” en la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

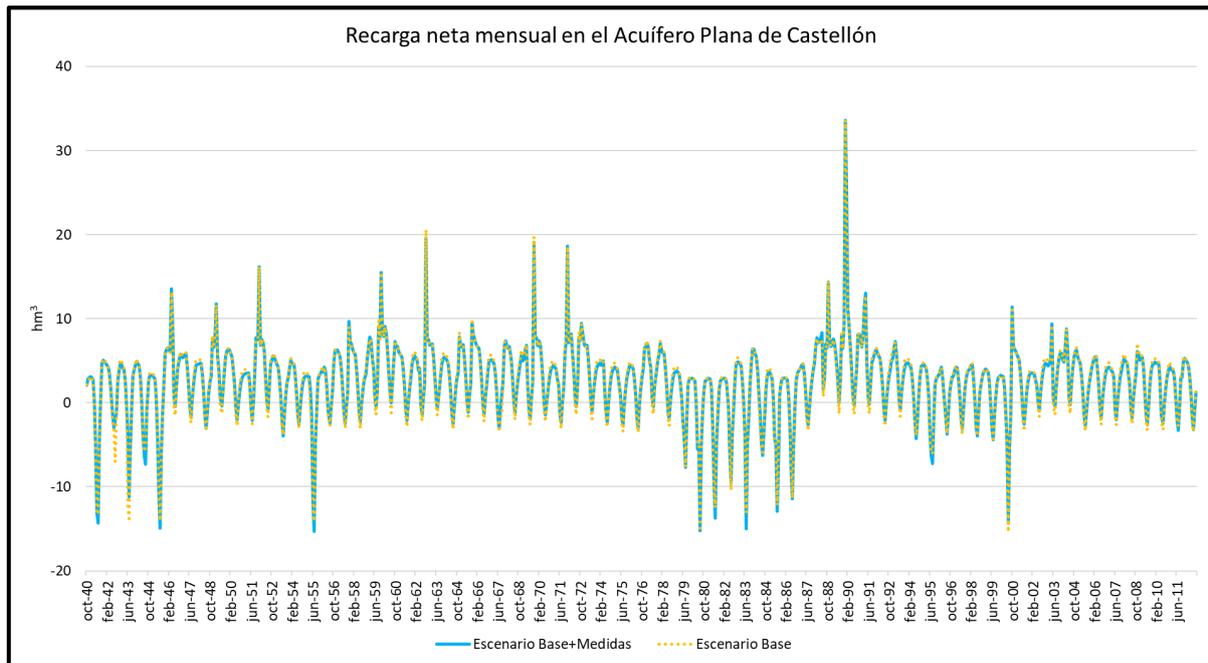
En cuanto al suministro subterráneo de los riegos mixtos, se presenta una reducción del bombeo promedio anual de 34.45 a 30.11 hm<sup>3</sup>. Analizando de forma desagregada los bombeos se reducen en 0.04, 0.16 y 4.14 hm<sup>3</sup> en las UDA Cota 220, Cota 100 y María Cristina, respectivamente. La mayor reducción en la última demanda está relacionada con lo observado en el “Escenario Base + MC”.

De los suministros de la UDA Vall d’Uixó, el suministro superficial se mantiene igual, el suministro subterráneo se reduce de 9.21 a 3.29 hm<sup>3</sup>, el suministro de la reutilización de la EDAR de Vall d’Uixó se reduce de 1.28 a 1.24 hm<sup>3</sup>, el suministro de los excedentes que incluye

recursos del río Mijares y reutilización de las EDAR Almassora y Borriana asciende a  $6.11 \text{ hm}^3$ , y el suministro de la desalinizadora es igual a  $0.18 \text{ hm}^3$ . En este escenario se presenta una mayor reducción en el bombeo que en los escenarios anteriores, las medidas que incluye la reutilización de otras EDAR y la derivación de excedentes del río Mijares son las principales causantes. En cuanto a la disminución del suministro de la EDAR de  $0.04 \text{ hm}^3$ , el contar con mayores recursos para esta UDA genera una disminución en el suministro por la EDAR Vall d'Uixó, es decir, un mayor volumen se pierde en el mar. De igual forma sucede con el suministro de la IDAM Moncófar que no logra aprovechar el suministro promedio permitido de  $0.2 \text{ hm}^3$ . Por último, del suministro de los excedentes se observó que  $2.72 \text{ hm}^3$  correspondían a los recursos derivados del río Mijares y  $3.39 \text{ hm}^3$  de las EDAR de Almassora y Borriana.

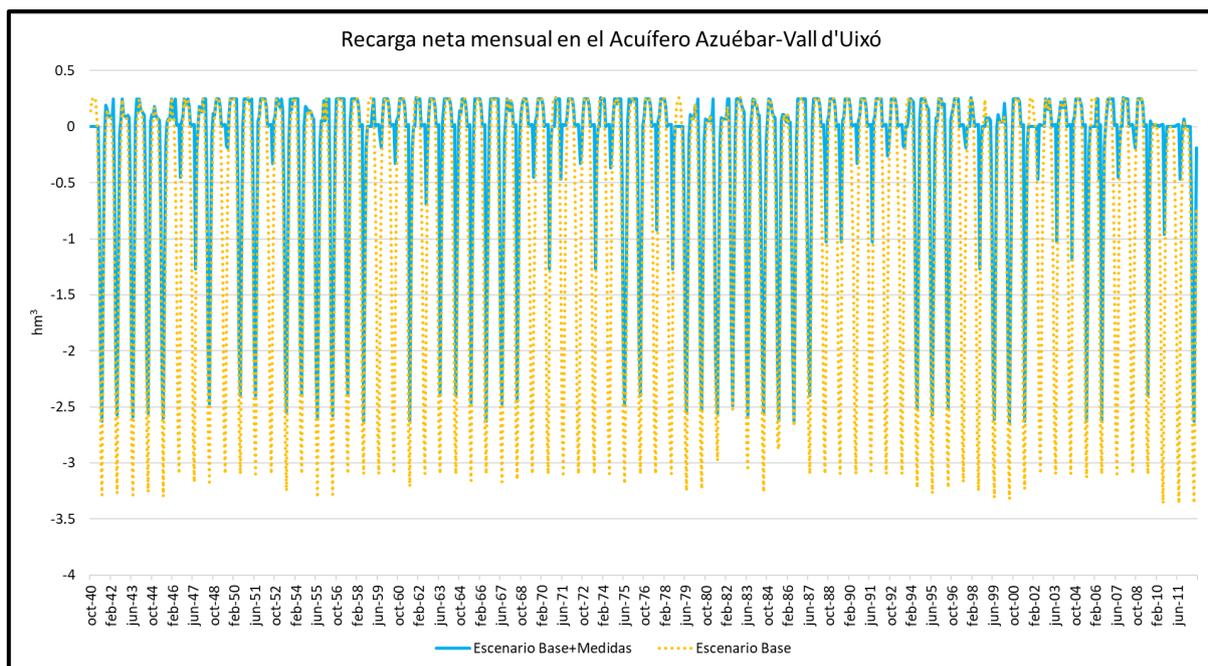
Respecto a los suministros en la UDA Moncófar, se observa principalmente la reducción del bombeo promedio anual de  $2.24$  a  $0.78 \text{ hm}^3$ , ello es causado por el aporte de los recursos superficiales derivados del río Mijares que asciende a  $0.61 \text{ hm}^3$  y por el suministro del recurso regenerado por la EDAR Moncófar, que es igual a  $0.91 \text{ hm}^3$ . Es decir, las medidas de la reutilización de la EDAR Moncófar y la derivación de excedentes del río Mijares por la Balsa de Belcaire son las causantes de las reducciones en el bombeo en esta UDA.

En el acuífero de la Plana de Castellón el bombeo promedio anual se reduce de  $36.16$  a  $31.4 \text{ hm}^3$ , mientras que en el acuífero de Azuébar – Vall d'Uixó se reduce de  $11.45$  a  $4.07 \text{ hm}^3$ . Según los resultados obtenidos en los escenarios evaluados por cada medida se puede indicar que para el primer caso la reducción es causada principalmente por la medida de incluir recursos del embalse de María Cristina y, para el segundo, un resultado en conjunto de las medidas de la reutilización de otras EDAR y la derivación de recursos del Mijares por la Balsa de Belcaire. En general las medidas mencionadas ayudan a reducir los bombeos en ambos acuíferos, siendo mayor en el acuífero de Azuébar – Vall d'Uixó.



**Figura 37.** Variación mensual de la recarga neta del acuífero de la Plana de Castellón ( $hm^3$ ) del “Escenario Base” y “Escenario Base + Medidas” en el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 38.** Variación mensual de la recarga neta del acuífero de Azuébar – Vall d’Uixó ( $hm^3$ ) del “Escenario Base” y “Escenario Base + Medidas” el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Analizando las garantías, con las medidas simuladas se obtuvo que de las cinco UDA que no cumplían con el criterio IPH en el “Escenario Base” solo las UDA Cota 220 y Cota 100 persisten con el incumplimiento. El máximo déficit de 10 años consecutivos es el que no se cumple en



ambos casos, sin embargo, se reducen de 132.65% y 133.33% a 123.15% y 123.9%, respectivamente. Esta reducción es debida a la medida de utilizar recursos del embalse de María Cristina para el riego. El cumplimiento del criterio en las UDA Riegos Tradicionales y Moncófar es resultado de la medida de reutilizar los recursos de las EDAR Castellón y Moncófar.

En cuanto a los déficits ponderados anuales de los grupos de interés se obtuvieron reducciones en la UDA Riegos Tradicionales de 3.02% a 1.39%, en los riegos mixtos de 1.28% a 1.15% y en las otras dos UDA de 2.06% a 0.48%. Las medidas en general producen reducciones en los déficits de todas las UDA, sin embargo, tal como se ha detallado en los apartados anteriores no todas las medidas tienen el mismo impacto.

En relación con la energía eléctrica producida, las medidas en su conjunto generaron una reducción de 83.2 a 83.17 GWh en promedio por año. Esta reducción es causada principalmente por la utilización de la Balsa de Belcaire con fines de riego permitiendo el paso de las aguas del río Mijares a las UDA Vall d'Uixó y Moncófar, dejando así una menor disponibilidad del recurso hídrico en las centrales hidroeléctricas. Sin embargo, observando la diferencia se puede indicar que el impacto no es muy significativo.

## 9. Análisis de las asignaciones futuras con las medidas propuestas y restricciones del PES

Una vez evaluadas cada medida por separado y en conjunto se procedió a realizar el análisis del modelo de gestión considerando las asignaciones futuras propuestas en el PHJ22/27. Debido a que las modificaciones de las demandas agrícolas se basan sobre el “Escenario Base + Medidas” se le denominó “Escenario Asignaciones + Medidas”. Principalmente se modificaron las demandas, las capacidades máximas de las tomas superficiales y subterráneas, y las capacidades de bombeo en ambos acuíferos.

A las reservas actuales propuestas por el PHJ22/27, mencionadas en cada medida, se debe incluir una más. En el PHJ16/21 se estableció una reserva anual de 10 hm<sup>3</sup> de origen superficial y subterráneo para abastecimiento, nuevas áreas de riego y actividades turísticas por encima del embalse de Arenós. En el PHJ22/27 se indica que del total queda por materializar 6.6 hm<sup>3</sup>. Es por ello por lo que en modelo se incluyó una demanda adicional denominada “UDA reserva Cabecera” para representar esta reserva. En la Tabla 16 se presenta el resumen de reservas incluidas para el presente modelo de gestión.

UDA	Origen	Destino	Reservas de recursos para usos previos (hm <sup>3</sup> /año)	
			PHJ16/21	PHJ22/27
Riegos tradicionales	EDAR Castellón	Mejora de la garantía	12	12
Vall d'Uixó	Desalinización IDAM Moncófar	Sustitución de bombeos para mejorar el estado cuantitativo de las masas de agua		0.5
	Reutilización EDAR Castellón	Sustitución de bombeos para mejorar el estado cuantitativo de las masas de agua	9	
	Reutilización EDAR Almassora			3.3
	Reutilización EDAR Borriana			4.7
	Superficial Mijares		7	7
Moncófar	Reutilización EDAR Moncófar	Sustitución de bombeos para mejorar el estado cuantitativo de las masas de agua	1	1.7
Unidades de demanda aguas arriba del embalse de Arenós	Recursos superficiales	Abastecimiento urbano, industrial y ganadero, nuevos regadíos y desarrollo de actividades turísticas	10	6.6
	Recursos subterráneos			

**Tabla 16.** Reservas anuales establecidas por el PHJ16/21 y propuestas en el PHJ22/27 (hm<sup>3</sup>) en la zona de estudio.

Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022.

Asimismo, en el PHJ22/27 se proponen cambios en las capacidades de suministros anuales máximas a las UDA, según como se puede apreciar en la Tabla 17. Comparando esta tabla con

la Tabla 8 se puede apreciar que las capacidades máximas que han aumentado son las de los orígenes superficiales y subterráneos.

UDA	Superficial (hm <sup>3</sup> /año)		Subterráneo (hm <sup>3</sup> /año)		Reutilización (hm <sup>3</sup> /año)	
	Curso	Volumen	Origen	Volumen	EDAR	Volumen
Canal Cota 220	Río Mijares	12.8	Pozos	18.3		
María Cristina	Rbla. Viuda	17.1	Pozos	15		
	Río Mijares	12				
Canal Cota 100	Río Mijares	32.7	Pozos	46.7		
Riegos tradicionales	Río Mijares	69.9	Pozos sequía	13.9		
Vall d'Uixó	Río Belcaire	1.2	Pozos	9.3	Vall d'Uixó	1.5
Moncófar			Pozos	2.3		

**Tabla 17.** Capacidad de suministro anual máximo en hm<sup>3</sup> según origen del recurso a las UDA consideradas en el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022.

En resumen, en la Tabla 18 se presentan todos los cambios referidos a la capacidad máxima de suministro anual y volúmenes de las reservas por origen, es decir, agrupa las dos tablas anteriormente descritas.

UDA	Superficial (hm <sup>3</sup> /año)		Subterráneo (hm <sup>3</sup> /año)		Reutilización (hm <sup>3</sup> /año)		Desalinización (hm <sup>3</sup> /año)	
	Curso	Volumen	Origen	Volumen	EDAR	Volumen	IDAM	Volumen
Riegos tradicionales	Río Mijares	69.9	Pozos sequía	13.9	Castellón	12		
Canal Cota 100	Río Mijares	32.7	Pozos	46.7				
Canal Cota 220	Río Mijares	12.8	Pozos	18.3				
María Cristina	Rbla. Viuda	17.1	Pozos	15				
	Río Mijares	12						
Vall d'Uixó	Río Belcaire	1.2	Pozos	9.3	Vall d'Uixó	1.5	Moncófar	0.2
	Río Mijares	7			Almassora Borriana	4		
Moncófar	Río Mijares		Pozos	2.3	Moncófar	1.3		
Reserva aguas arriba	Río Mijares	6.6	Pozos	6.6*				

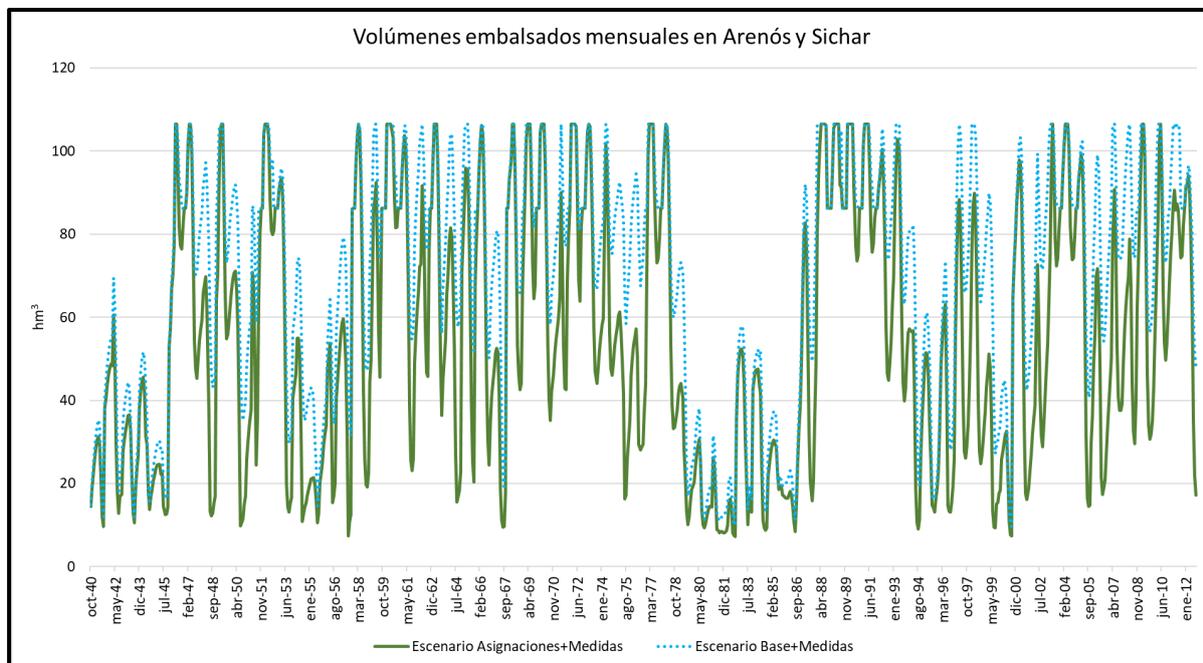
**Tabla 18.** Capacidad de suministro anual máximo y reservas en hm<sup>3</sup> según origen de los recursos a las UDA consideradas en el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Confederación Hidrográfica del Júcar, 2022.

En cuanto a las demandas anuales, en el PHJ22/27 se propone aumentar las asignaciones de todas las demandas agrícolas, con demandas anuales de 69.9, 18.3, 46.7, 22.3, 12.0 y 2.4 hm<sup>3</sup> para las UDA Riegos Tradicionales, Cota 220, Cota 100, María Cristina, Vall d'Uixó y Moncófar, respectivamente.

Una vez realizadas las modificaciones en el modelo de gestión se analizaron los resultados de la simulación y se obtuvo que el aumento de las demandas agrícolas generó en los volúmenes

embalsados en Arenós y Sichar una reducción considerable en el número de llenados, pasando de 100 a 57 veces (Figura 39). En cuanto al número de vaciados, se mantiene en 0 veces, aunque el volumen mínimo registrado fue de 7.31 hm<sup>3</sup>, 2.28 hm<sup>3</sup> menos que el “Escenario Asignaciones + Medidas”.



**Figura 39.** Simulación mensual de los volúmenes embalsados en Arenós y Sichar (hm<sup>3</sup>) en “Escenario Base + Medidas” y “Escenario Asignaciones + Medidas” el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Al tener una mayor demanda hídrica es de esperar que los suministros superficiales se vean aumentados, generando así la disminución en los volúmenes embalsados. Sin embargo, lo mismo no sucede en los suministros subterráneos de las UDA de los riegos mixtos por efecto de las reglas de operación derivadas del PES y el aumento del suministro superficial. A continuación, se detallarán los suministros por cada UDA según lo presentado en la Figura 40.

En la UDA Riegos Tradicionales, el suministro superficial aumentó en promedio por año de 59.18 a 61.71 hm<sup>3</sup> y, de igual forma, el bombeo promedio anual de los pozos de sequía aumentó de 1.29 a 2.29 hm<sup>3</sup>.

En las UDA Cota 220 y Cota 100, los suministros superficiales aumentaron en conjunto de 23.5 a 33.75 hm<sup>3</sup>. En cambio, los suministros subterráneos disminuyeron de 7.91 y 20.81 a 7.59 y 19.34 hm<sup>3</sup>, respectivamente. Esta disminución en los bombeos se da como respuesta al aumento de la capacidad de suministro con recursos superficiales del río Mijares.



**Figura 40.** Suministro a las demandas agrícolas ( $\text{hm}^3$ ) en “Escenario Base + Medidas” y “Escenario Asignaciones + Medidas” en la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

En la UDA María Cristina todos los suministros se vieron incrementados, el suministro superficial del río Mijares de 4.09 a 5.48  $\text{hm}^3$ , el suministro subterráneo de 1.39 a 4.31  $\text{hm}^3$  y el suministro del embalse de María Cristina de 6.86 a 10.47  $\text{hm}^3$ . A diferencia de las UDA Cota 220 y Cota 100, los suministros subterráneos se ven aumentados principalmente porque el incremento de los recursos superficiales no llega a beneficiar en la reducción de los bombeos.

Al aumentar el suministro superficial de las demandas agrícolas que se benefician directamente del río Mijares se reduce el volumen que se deriva, a través de la Balsa de Belcaire, a las UDA Vall d’Uixó y Moncófar; las reducciones se dan de 6.11 y 0.61  $\text{hm}^3$  a 5.07 y

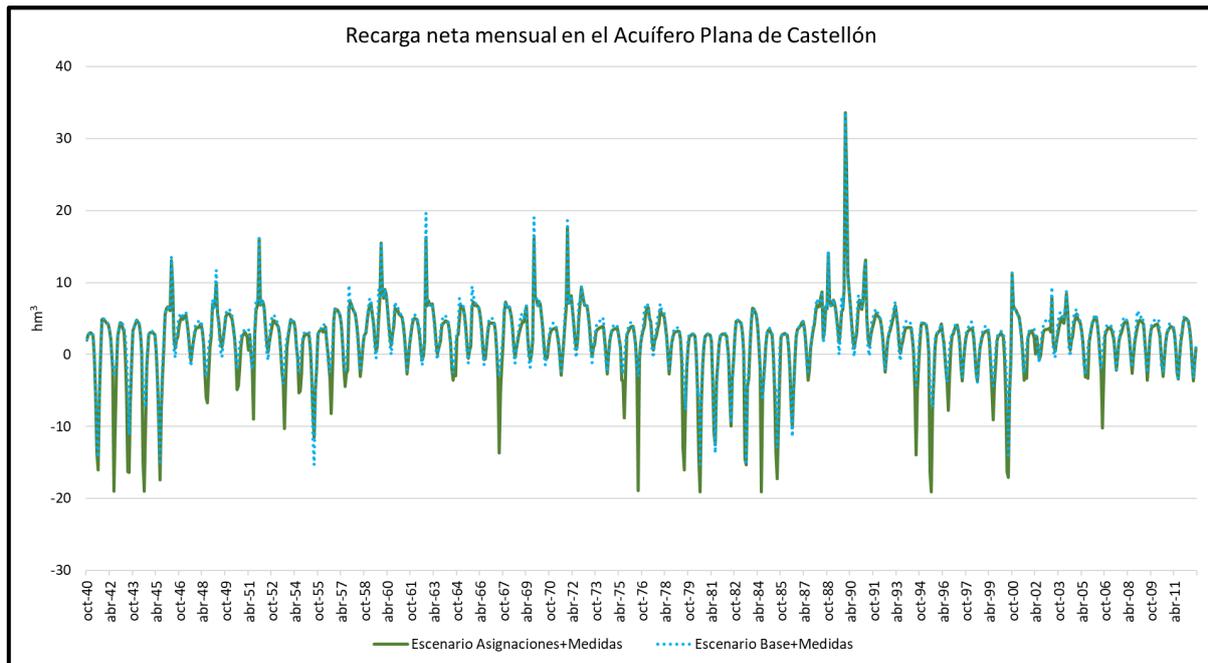
0.34 hm<sup>3</sup>, respectivamente. Por esta razón, en ambas unidades el bombeo promedio se ve aumentado de 3.29 y 0.78 hm<sup>3</sup> a 4.52 y 1.09 hm<sup>3</sup>. Por otro lado, pese a que no se realizaron cambios en las capacidades máximas de las conducciones de reutilización, el suministro de este recurso no convencional se ve aumentado de 1.24 y 0.91 hm<sup>3</sup> a 1.27 y 0.92 hm<sup>3</sup>, respectivamente. No llega a aprovecharse el total debido a que existen meses en los que la oferta excede la demanda y, por ende, se vierte agua al mar.

Para los otros suministros de la UDA Vall d'Uixó, el suministro superficial aumenta de 0.68 a 0.9 hm<sup>3</sup> y el suministro de la desalinizadora disminuye de 0.18 a 0.15 hm<sup>3</sup>. Este escenario es contraproducente en el suministro de la IDAM Moncófar, debido a que el aumento de la demanda es variable en cada mes mientras que la oferta de la desalinizadora es igual en todos los meses, por lo que al tener mayores recursos en los meses de baja demanda genera que un mayor volumen de agua procedente de la desalinizadora que no se aprovecha.

Además, según como se indicó en las reservas propuestas, se incluye una demanda aguas arriba del sistema que representa la reserva del sistema para futuras asignaciones que asciende a 6.6 hm<sup>3</sup> anuales.

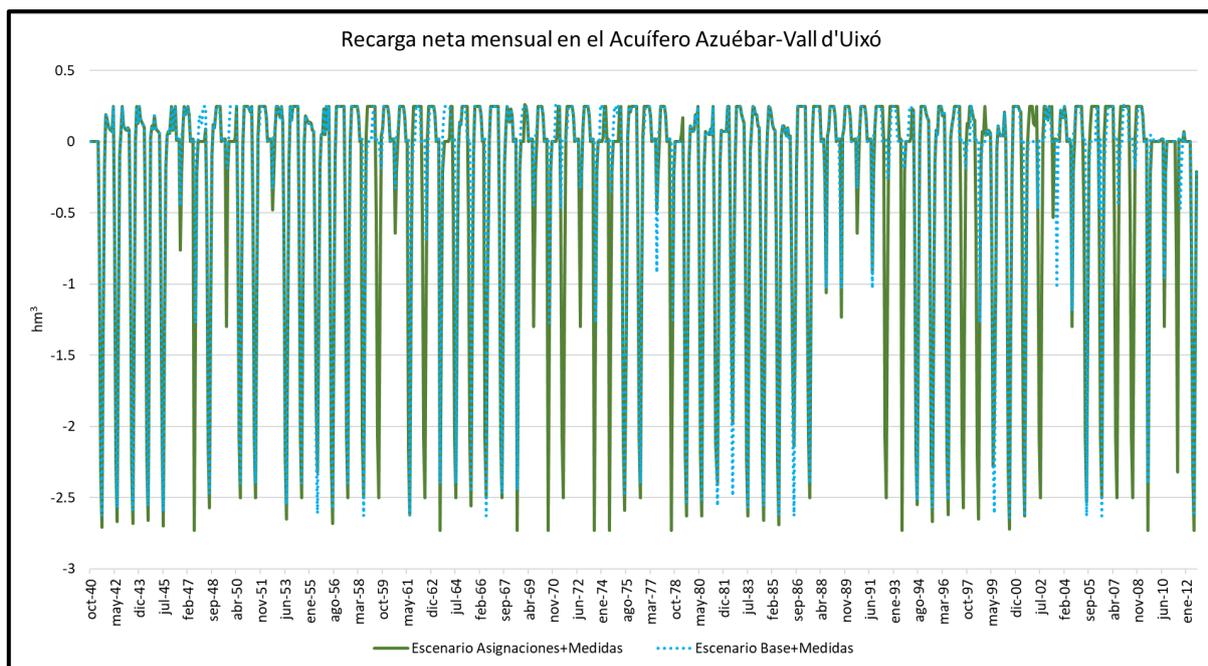
A nivel de acuífero, en el acuífero de la Plana de Castellón aumenta el bombeo promedio anual de 31.40 a 33.53 hm<sup>3</sup>, y en el acuífero de Azuébar – Vall d'Uixó de 4.07 a 5.61 hm<sup>3</sup>. Respecto a las recargas netas promedios mensuales, en el primero se reduce de 2.67 a 1.98 hm<sup>3</sup>, y en el segundo de -0.21 a -0.33 hm<sup>3</sup>. Comparándolos con el “Escenario Base” se observa que el acuífero estaría en una situación con una recarga neta menor, pero de igual forma positiva, mientras que en el acuífero de Azuébar – Vall d'Uixó tendría una recarga mayor, pero permanecería siendo negativa. A largo plazo este último acuífero seguirá siendo objeto de estudio por presentar problemas en el estado cuantitativo.

En cuanto a las garantías de las demandas se observó que solo dos cumplieron con el criterio IPH, las cuales fueron las UDA Vall d'Uixó y Moncófar. Esto significa que del “Escenario Base + Medidas” al actual pasan a incumplir el criterio las UDA Riegos Tradicionales y María Cristina, por otro lado, las UDA Cota 220 y Cota 100 mantienen el incumplimiento. Cabe indicar que en el escenario con asignaciones totales del modelo del PHJ22/27 se indicó que la UDA Riegos Tradicionales cumple con el criterio de garantía, lo cual es contrario a lo obtenido en el presente modelo.



**Figura 41.** Variación mensual de la recarga neta del acuífero de la Plana de Castellón ( $hm^3$ ) del “Escenario Base + Medidas” y “Escenario Asignaciones + Medidas” en el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 42.** Variación mensual de la recarga neta del acuífero de Azuébar – Vall d’Uixó ( $hm^3$ ) del “Escenario Base + Medidas” y “Escenario Asignaciones + Medidas” el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

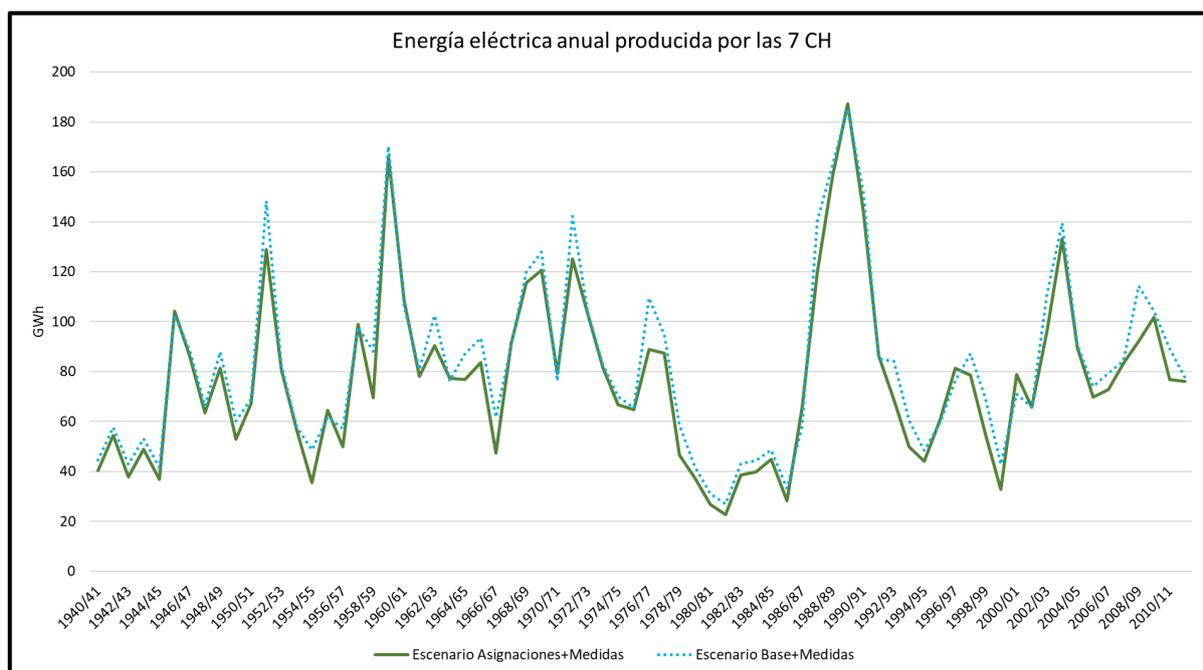
Los máximos déficits en las UDA que incumplen el criterio aumentaron considerablemente. La UDA Riegos Tradicionales incumplen para 2 y 10 años consecutivos, y las UDA Cota 220, Cota

100 y María Cristina incumplen para 1, 2 y 10 años. En cuanto los fallos, en todas las UDA que incumplen el criterio aumentan, del escenario anterior al actual, entre 7 y 27.

Respecto a los déficits ponderados anuales por grupo de demandas, para la UDA Riegos Tradicionales aumentó de 1.39% a 4.96%, para los riegos mixtos aumentó de 1.15% a 2.85% y para las UDA Vall d'Uixó y Moncófar aumentó de 0.04% a 0.48%.

Al comparar estos resultados con las garantías obtenidas en el "Escenario Base" se obtuvieron máximos déficits y números de fallos mayores para las UDA Riegos Tradicionales, Cota 220, Cota 100 y María Cristina, mientras que las UDA Vall d'Uixó y Moncófar se obtuvieron máximos déficits menores y sin fallos. Esto indica que al aumentar la demanda en cada una de las unidades de riego con la implantación de las diferentes medidas se presentará un gran déficit en las demandas de riego tradicionales y mixtos; mientras que en el caso de las otras demandas se reducirían los déficits.

Respecto a la energía eléctrica producida, ésta se verá reducida en mayor medida que los escenarios anteriores y es debido a la menor disponibilidad de los recursos hídricos en el río Mijares para derivar a las centrales hidroeléctricas, del "Escenario Base + Medidas" al actual se redujo de 82.78 a 77.30 GWh en promedio por año (Figura 43).



**Figura 43.** Simulación de la energía hidroeléctrica producida anualmente (GWh) en "Escenario Base + Medidas" y "Escenario Asignaciones + Medidas" en el modelo de gestión de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

## 10. Resumen comparativo de escenarios

En este apartado se resumen los resultados obtenidos entre los apartados 5 y 9, es decir, desde el modelo de gestión en situación actual hasta el modelo que incluye las asignaciones futuras, escenarios de escasez y medidas propuestas por el PHJ22/27.

Tal como se indicó el “Escenario PHJ” corresponde al modelo de gestión que incluye todas las consideraciones del PHJ22/27 en situación actual y tiene la finalidad de obtener un modelo calibrado. Seguido a ello, en el “Escenario Base” se incluyeron los escenarios de escasez derivados del PES. Al comparar ambos escenarios se observó lo siguiente:

- Los vertidos de los tres embalses no sufrieron variación alguna.
- En el volumen embalsado por los embalses de Arenós y Sicha el número de llenados se mantuvo en 101 veces, mientras que el número de vaciados disminuyó de 15 a 0 veces. El mínimo volumen registrado pasó de 3.9 a 9.93 hm<sup>3</sup>.
- En el suministro superficial de los riegos mixtos aumentó entre 0.18 y 0.71 hm<sup>3</sup>, el de la UDA Riegos Tradicionales disminuyó en 2.62 hm<sup>3</sup> y el de la UDA Vall d’Uixó disminuyó en 0.02 hm<sup>3</sup>.
- Todos los suministros subterráneos se redujeron entre 0.05 y 1.77 hm<sup>3</sup> por año, a excepción de los pozos de sequía que aumentaron el suministro anual en 1.24 hm<sup>3</sup>.
- El suministro de reutilización de la EDAR Vall d’Uixó no sufrió alteraciones debido a que no está restringido por una regla de operación derivada de los escenarios de escasez.
- En los acuíferos de la Plana de Castellón y Azuébar – Vall d’Uixó se presentan reducciones del bombeo anual en 1.1 y 0.15 hm<sup>3</sup>, respectivamente.
- La energía hidroeléctrica promedio anual se reduce en 0.2 GWh.
- En el cumplimiento de las garantías según el criterio IPH, se reduce en número de unidades que los cumplen de 4 a 1 UDA. La UDA Vall d’Uixó es la única que mantiene el cumplimiento, sin embargo, aumentan considerablemente los máximos déficits a 1, 2 y 10 años consecutivos.
- El déficit ponderado promedio anual aumenta principalmente en la UDA Riegos Tradicionales y en los riegos mixtos, siendo en 1.39 y 0.67 hm<sup>3</sup>, respectivamente. En función de la demanda representan aumentos en 2.21% y 1.02%.

Parámetro		Unidad	Escenario	
			PHJ	Base
3 Embalses	Vertidos	hm <sup>3</sup> /año	6.87	6.87
Embalses Arenós y Sichar	Nº llenado	veces	101	101
	Nº vaciado	veces	15	0
Acuífero Plana de Castelló	Bombeo	hm <sup>3</sup> /año	37.26	36.16
	Recarga neta	hm <sup>3</sup> /mes	2.53	2.68
Acuífero Azuébar - Vall d'Uixó	Bombeo	hm <sup>3</sup> /año	11.60	11.45
	Recarga neta	hm <sup>3</sup> /mes	-0.76	-0.74
Energía eléctrica producida	7 CH	GWh/año	82.99	82.80
Déficit Ponderado relacionado con la demanda anual	Riegos Tradicionales	%	0.81%	3.02%
	Cota220, Cota100 y MC	%	0.26%	1.28%
	Vall d'Uixó y Moncófar	%	1.33%	2.06%

**Tabla 19.** Resumen de resultados de los modelos en el “Escenario PHJ” y “Escenario Base” en la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

En función del “Escenario Base” se incorporaron al modelo de gestión las medidas descritas en el PHJ22/27 de forma independiente a fin de analizar el efecto de cada una de ellas. Las medidas analizadas fueron: la reutilización de recursos depurados de las EDAR Moncófar, Almassora, Borriana y Castellón; la desalinización por la IDAM Moncófar; la derivación de recursos del río Mijares por la Balsa de Belcaire para el suministro; y el suministro de recursos del embalse de María Cristina. Como resultado se tuvieron el “Escenario Base + Reutilización”, “Escenario Base + Desalinización”, “Escenario Base + Balsa” y “Escenario Base + MC”. Al comparar todos los escenarios con el “Escenario Base” se observó lo siguiente:

- Los vertidos de los tres embalses principales se vieron reducidos mayormente en la medida de María Cristina, con una reducción promedio anual de 0.11 hm<sup>3</sup>.
- La medida de derivar recursos por la Balsa de Belcaire genera mayores reducciones en los volúmenes embalsados en Arenós y Sichar, reduciendo el número de llenados de 101 a 99 veces y el volumen mínimo registrado de 9.93 a 9.63 hm<sup>3</sup>.
- En la UDA Riegos Tradicionales, la garantía cumple el criterio IPH solo con la medida de reutilizar recursos de la EDAR Castellón. Además, en este escenario es donde más se reduce el bombeo, siendo en promedio anual hasta 0.35 hm<sup>3</sup>. En la medida que suministra recursos del embalse de María Cristina permite también reducir el bombeo promedio anual en 0.18 hm<sup>3</sup>, sin embargo, persiste el incumplimiento del criterio.
- En las UDA Cota 220 y Cota 100, las garantías incumplen el criterio IPH en todos los escenarios para 10 años consecutivos, no obstante, con la medida de suministrar

recursos del embalse de María Cristina se logra reducir mínimamente los máximos déficits de 10 años hasta en 7.4%. Acorde con este escenario, en el suministro superficial de ambas unidades se ve aumentado en promedio anual hasta en  $0.21 \text{ hm}^3$  por contar con mayores recursos en la zona media de la cuenca del Mijares; mientras que en el suministro subterráneo se presentan reducciones en promedio anual de hasta  $0.19 \text{ hm}^3$ .

- En la UDA María Cristina, la garantía cumple con el criterio IPH solo con la medida de utilizar recursos del embalse de María Cristina. En este escenario tanto el suministro superficial como el subterráneo se ven reducidos en  $2.16$  y  $4.14 \text{ hm}^3$  en promedio por año.
- En la UDA Vall d'Uixó, la garantía se cumple con el criterio IPH en todos los escenarios. Sin embargo, con la medida de la reutilización de las EDAR Almassora y Borriana se logra reducir el déficit promedio a  $0.01 \text{ hm}^3$ . Asimismo, en este escenario se presentan las mayores reducciones de bombeos hasta por  $3.44 \text{ hm}^3$  en promedio por año. Por otro lado, la medida de derivar recursos del Mijares por la Balsa de Belcaire es la segunda opción que reduce más los bombeos, siendo de hasta  $2.66 \text{ hm}^3$ .
- En la UDA Moncófar, la garantía cumple el criterio IPH solo con la medida de la reutilización de la EDAR Moncófar, el déficit promedio anual se reduce a  $0.004 \text{ hm}^3$ . El suministro subterráneo se ve reducido en este escenario hasta por  $0.86 \text{ hm}^3$  en promedio anual; en el escenario que implica derivar recursos del río Mijares por la Balsa de Belcaire se reduce el bombeo hasta en  $0.81 \text{ hm}^3$ .
- En el acuífero de la Plana de Castellón se presentan reducciones del bombeo anual solo en las medidas de utilizar recursos del embalse de María Cristina y la reutilización de las EDAR, en  $4.56$  y  $0.35 \text{ hm}^3$ , respectivamente.
- En el acuífero de Azuébar – Vall d'Uixó se dan reducciones del bombeo en todos los escenarios, en las medidas de las reutilizaciones de las EDAR y la derivación de recursos del río Mijares por la Balsa de Belcaire las reducciones se dan hasta en  $4.3$  y  $3.47 \text{ hm}^3$  en promedio por año, mientras que en las otras medidas la reducción es de  $0.01 \text{ hm}^3$ .
- La energía hidroeléctrica solo se reduce en las medidas de la derivación de recursos del río Mijares por la Balsa de Belcaire y el suministro de recursos del embalse de María Cristina. Las reducciones en promedio anual son  $0.03$  y  $0.02 \text{ GWh}$ , respectivamente.

- El déficit ponderado promedio anual se reduce en la UDA Riegos Tradicionales con la medida de la reutilización de las EDAR del 3.02% al 1.36%. Para el grupo de interés de las UDA Vall d'Uixó y Moncófar en el mismo escenario se da la mayor reducción del déficit, siendo del 2.06% al 0.04%. Por otro lado, en la UDA Cota 220 y Cota 100 la mayor reducción del déficit se da con la medida de utilizar recursos del embalse de María Cristina pasando de un déficit ponderado anual de 1.28% a 1.13%.

Parámetro		Unidad	Escenario				
			Base	Base +			
				Reutilización	Desalinización	Balsa	MC
3 Embalses	Vertidos	hm <sup>3</sup> /año	6.87	6.87	6.87	6.83	6.76
Embalses Arenós y Sichar	Nº llenado	veces	101	101	101	99	102
	Nº vaciado	veces	0	0	0	0	0
Acuífero Plana de Castelló	Bombeo	hm <sup>3</sup> /año	36.16	35.81	36.16	36.20	31.60
	Recarga neta	hm <sup>3</sup> /mes	2.68	2.70	2.68	2.65	2.69
Acuífero Azuébar - Vall d'Uixó	Bombeo	hm <sup>3</sup> /año	11.45	7.15	11.44	7.98	11.44
	Recarga neta	hm <sup>3</sup> /mes	-0.74	-0.39	-0.74	-0.54	-0.74
Energía eléctrica producida	7 CH	GWh/año	82.80	82.80	82.80	82.77	82.78
Déficit Ponderado relacionado con la demanda anual	Riegos Tradicionales	%	3.02%	1.36%	3.02%	3.11%	2.91%
	Cota220, Cota100 y MC	%	1.28%	1.28%	1.28%	1.32%	1.13%
	Vall d'Uixó y Moncófar	%	2.06%	0.04%	1.29%	1.30%	2.10%

**Tabla 20.** Resumen de resultados de los modelos en el "Escenario Base", "Escenario Base + Reutilización", "Escenario Base + Desalinización", "Escenario Base + Balsa" y "Escenario Base + MC" en la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Posterior a ello se realizó la simulación del modelo de gestión considerando todas las medidas analizadas, denominándola "Escenario Base + Medidas". Los resultados se compararon con los del "Escenario Base" y se pudo observar lo siguiente:

- El total de los vertidos de los tres embalses se ve reducido en 0.19 hm<sup>3</sup> en promedio por año.
- El volumen embalsado mensual promedio en Arenós y Sichar aumentó ligeramente de 70.04 a 70.23 hm<sup>3</sup>, el número de llenados se redujo de 101 a 100 veces y el volumen mínimo registrado fue de 9.59 hm<sup>3</sup>. La disminución del volumen mínimo es debido a la medida de la derivación de recursos del río Mijares por la Balsa de Belcaire.
- En la UDA Riegos Tradicionales, la garantía pasa a cumplir con el criterio IPH y es gracias a la medida de reutilizar recursos de la EDAR Castellón. El suministro superficial promedio anual aumentó en 0.18 hm<sup>3</sup> y el suministro subterráneo de los pozos de sequía se redujo en 0.42 hm<sup>3</sup>.



- En la UDA Cota 220 y Cota 100, las garantías mantienen el incumplimiento del criterio IPH para 10 años, sin embargo, se reducen los máximos déficits a 10 años hasta en 9.5%. En ambos casos el número de fallos se reduce en 1. Respecto al suministro superficial, en ambos se da un aumento en promedio anual de hasta  $0.17 \text{ hm}^3$ , mientras que el suministro subterráneo se reduce hasta en  $0.16 \text{ hm}^3$ . La medida causante de todo lo mencionado es el uso de los recursos del embalse de María Cristina.
- En la UDA María Cristina, la garantía pasa a cumplir con el criterio IPH. El suministro superficial y subterráneo disminuye en  $2.28$  y  $4.14 \text{ hm}^3$  en promedio anual, respectivamente. La medida de utilizar los recursos del embalse de María Cristina es la principal responsable.
- En la UDA Vall d'Uixó, la garantía mantiene el cumplimiento del criterio IPH, los máximos déficits se ven reducidos hasta en 74.62%. Con las medidas el suministro subterráneo se ve reducido en  $5.92 \text{ hm}^3$  en promedio anual y el aporte de los recursos del río Mijares asciende a  $6.11 \text{ hm}^3$ .
- En la UDA Moncófar, la garantía pasa a cumplir con el criterio IPH y el déficit promedio anual se reduce a  $0.01 \text{ hm}^3$ . Con las medidas de la reutilización de la EDAR Moncófar y la derivación de excedentes del río Mijares se logra reducir el bombeo en  $1.46 \text{ hm}^3$  en promedio anual.
- En los acuíferos de la Plana de Castellón y Azuébar – Vall d'Uixó se presentan reducciones del bombeo anual en  $4.76$  y  $7.38 \text{ hm}^3$ , respectivamente. La recarga neta en la primera se mantiene igual y en la segunda aumenta de  $-0.74$  a  $-0.21 \text{ hm}^3$ .
- La energía hidroeléctrica se reduce en  $0.02 \text{ GWh}$  en promedio anual.
- El déficit ponderado promedio anual de las UDA Vall d'Uixó y Moncófar se reduce en un 2.02%; el déficit de la UDA Riegos Tradicionales se reduce en un 1.63%; y el déficit ponderado de los riegos mixtos se reduce en un 0.13%.

Parámetro		Unidad	Escenario	
			Base	Base + Medidas
3 Embalses	Vertidos	hm <sup>3</sup> /año	6.87	6.68
Embalses Arenós y Sichar	Nº llenado	veces	101	100
	Nº vaciado	veces	0	0
Acuífero Plana de Castelló	Bombeo	hm <sup>3</sup> /año	36.16	31.40
	Recarga neta	hm <sup>3</sup> /mes	2.68	2.68
Acuífero Azuébar - Vall d'Uixó	Bombeo	hm <sup>3</sup> /año	11.45	4.07
	Recarga neta	hm <sup>3</sup> /mes	-0.74	-0.21
Energía eléctrica producida	7 CH	GWh/año	82.80	82.78
Déficit Ponderado relacionado con la demanda anual	Riegos Tradicionales	%	3.02%	1.39%
	Cota220, Cota100 y MC	%	1.28%	1.15%
	Vall d'Uixó y Moncófar	%	2.06%	0.04%

**Tabla 21.** Resumen de resultados de los modelos en el “Escenario Base” y “Escenario Base + Medidas” en la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

Dado que en el PHJ22/27 se establecen asignaciones futuras para cada UDA se modificó el modelo acorde a esas nuevas demandas y se le denominó “Escenario Asignaciones + Medidas”. Al comparar estos resultados con los del “Escenario Base + Medidas” se observó lo siguiente:

- El total de los vertidos de los tres embalses se ve reducido en 0.91 hm<sup>3</sup> en promedio por año.
- El volumen embalsado mensual promedio en Arenós y Sichar disminuyó considerablemente de 70.23 a 55.74 hm<sup>3</sup>, el número de llenados se redujo de 100 a 58 veces y el volumen mínimo registrado disminuyó de 9.59 a 7.31 hm<sup>3</sup>.
- En la UDA Riegos Tradicionales, la garantía pasa a incumplir el criterio IPH con 11 fallos. El suministro superficial, subterráneo y reutilización aumentan en 2.53, 1 y 1.17 hm<sup>3</sup> por año, respectivamente.
- En la UDA Cota 220 y Cota 100, las garantías mantienen el incumplimiento del criterio IPH y los máximos déficits a 1, 2 y 10 años aumentan considerablemente entre 15.55% y 104.18%. Asimismo, el número de fallos aumenta de 5 a 12 en ambos casos. En cuanto al suministro superficial, aumenta en ambos hasta 5.54 hm<sup>3</sup> por año, mientras que el suministro subterráneo se ve reducido hasta en 1.47 hm<sup>3</sup>. La reducción es debida a que se producen mayores periodos de escasez hídrica por la reducción de los volúmenes almacenados en Arenós y Sichar, lo cual genera mayores restricciones en el bombeo por las reglas de operación.

- En la UDA María Cristina, la garantía pasa nuevamente a incumplir con el criterio IPH con 27 fallos. Los suministros superficiales, subterráneos y del embalse de María Cristina aumentan 1.39, 2.92 y 3.61 hm<sup>3</sup> por año, respectivamente.
- En la UDA Vall d'Uixó, la garantía mantiene el cumplimiento del criterio IPH, los máximos déficits se ven aumentados hasta en un 23.57%. El suministro superficial, subterráneo y reutilización aumenta en 0.22, 1.23 y 0.03 hm<sup>3</sup> por año, respectivamente; mientras que el suministro de la desalinización y los excedentes del río Mijares se reduce en 0.03 y 1.04 hm<sup>3</sup>.
- En la UDA Moncófar, la garantía mantiene el cumplimiento del criterio IPH pese a aumentar los máximos déficits. El suministro superficial aumenta en 0.31 hm<sup>3</sup> en promedio anual, el suministro subterráneo aumenta en 0.01 hm<sup>3</sup> y el suministro de los excedentes del Mijares se reduce en 0.27 hm<sup>3</sup>.
- En los acuíferos de la Plana de Castellón y Azuébar – Vall d'Uixó los bombeos aumentan en 2.13 y 1.54 hm<sup>3</sup> por año, respectivamente. La recarga neta en la primera disminuye de 2.68 a 1.98 hm<sup>3</sup> y, en la segunda, disminuye de -0.21 a -0.33 hm<sup>3</sup>.
- La energía hidroeléctrica se reduce considerablemente en 5.48 GWh en promedio anual.
- En todos los grupos de interés el déficit ponderado aumenta, principalmente en la UDA Riegos Tradicionales de 1.39% a 4.96%.

Parámetro		Unidad	Escenario	
			Base + Medidas	Asignaciones + Medidas
3 Embalses	Vertidos	hm <sup>3</sup> /año	6.68	5.77
Embalses Arenós y Schar	Nº llenado	veces	100	58
	Nº vaciado	veces	0	0
Acuífero Plana de Castelló	Bombeo	hm <sup>3</sup> /año	31.40	33.53
	Recarga neta	hm <sup>3</sup> /mes	2.68	1.98
Acuífero Azuébar - Vall d'Uixó	Bombeo	hm <sup>3</sup> /año	4.07	5.61
	Recarga neta	hm <sup>3</sup> /mes	-0.21	-0.33
Energía eléctrica producida	7 CH	GWh/año	82.78	77.30
Déficit Ponderado relacionado con la demanda anual	Riegos Tradicionales	%	1.39%	4.96%
	Cota220, Cota100 y MC	%	1.15%	2.85%
	Vall d'Uixó y Moncófar	%	0.04%	0.48%

**Tabla 22.** Resumen de resultados de los modelos en el “Escenario Base + Medidas” y “Escenario Asignaciones + Medidas” en la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

## 11. Conclusiones

Del presente trabajo se pueden extraer las siguientes conclusiones sobre el sistema de explotación del Mijares – Plana de Castellón:

- Es necesario sincronizar la información presentada en el Plan Hidrológico Júcar 2022-2027 con el Plan Especial de Sequía 2018, especialmente en lo que respecta a los caudales ecológicos que están presentes en ambos instrumentos.
- Se demuestra la importancia del acople del PHJ con las reglas de operación derivadas del PES (“Escenario Base”), pues se pone de manifiesto que, en situación actual, cuatro de las seis UDA incumplen con los criterios de garantía establecidos en la IPH. Antes de incluir estas reglas de operación, solo la UDA María Cristina incumplía con el criterio y con las reglas pasaron a incumplir adicionalmente las UDA Riegos Tradicionales, Cota 220 y Cota 100.
- La medida propuesta en el PHJ22/27 que brindó mayores beneficios para el sistema de explotación fue la de reutilizar el agua depurada de otras EDAR adicionales de la EDAR Vall d’Uixó. Con la incorporación de estos nuevos recursos no convencionales se mejoraron las garantías, hasta el cumplimiento del criterio IPH en las UDA Riegos Tradicionales, Vall d’Uixó y Moncófar. Asimismo, con esta medida se registra el menor bombeo promedio anual en el acuífero de Azuébar – Vall d’Uixó (un 37% menos que el bombeo en el “Escenario Base”).
- La medida de desalinización para uso agrícola beneficia únicamente a la UDA Vall d’Uixó. En comparación con el “Escenario Base” el déficit promedio anual disminuye un 1.1% de la demanda anual, y se mantiene el cumplimiento de la garantía.
- La medida que implica utilizar la Balsa de Belcaire como un elemento regulador para utilizar recursos del río Mijares en el suministro a las UDA Vall d’Uixó y Moncófar reduce el bombeo promedio anual en el acuífero de Azuébar – Vall d’Uixó un 30% con respecto al “Escenario Base”. Las garantías se mantienen iguales en ambos escenarios, lo que demostraría que esta medida mejora la situación de este acuífero sin perjudicar significativamente a las otras UDA.
- El utilizar los recursos del embalse de María Cristina beneficia principalmente al suministro a la UDA María Cristina, reduciendo el déficit y cumpliendo con los criterios de garantía de la IPH. Como consecuencia se reduce el bombeo promedio anual en el



acuífero de la Plana de Castellón un 12.6% con respecto al “Escenario Base”. El incumplimiento de las garantías de las otras UDA se mantienen igual, no obstante, la medida genera la reducción de los déficits en las UDA Riegos Tradicionales, Cota 220 y Cota 100.

- Al considerar todas las medidas se redujeron los bombeos promedios anuales en los acuíferos de la Plana de Castellón y Azuébar – Vall d’Uixó un 13% y 64%, respectivamente, con respecto al “Escenario Base”. Además, con estas medidas las UDA Riegos Tradicionales, María Cristina, Vall d’Uixó y Moncófar cumplen con el criterio de la IPH.

## 12. Referencias

- Andreu, J. (2012). *Integración de metodologías multidisciplinares en la planificación hidrológica dentro del ámbito de la Directiva Marco Europea en políticas de aguas.*
- Andreu, J.; Solera, A.; Capilla, J. y Ferrer, J. (2017). *Modelo SIMGES de simulación de la gestión de recursos hídricos, incluyendo utilización conjunta - Versión 3.03.01.*
- Cabrera, G. (2021). El cambio climático y la cuenca del Mediterráneo: un asunto de seguridad humana. *Bie3: Boletín IEEE*, 21, 799–812.
- Carlosama, K. y Granda, M. (2022). *Evaluación de escasez hídrica y estado de conservación de las vertientes de agua de consumo humano en la parroquia Angochagua.* Universidad Técnica del Norte.
- Collazos, G. (2004). *Sistema soporte de decisión para evaluación y optimización económica de sistemas de recursos hídricos.* Universidad Politécnica de Valencia.
- Confederación Hidrográfica del Júcar. (2015). *Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar, ciclo de planificación hidrológica 2015-2021.*
- Confederación Hidrográfica del Júcar. (2018). *Plan Especial de Sequía de la Demarcación Hidrográfica del Júcar.*
- Confederación Hidrográfica del Júcar. (2022). *Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar, ciclo de planificación hidrológica 2022-2027.*
- Estrada, F. (1991). *Criterios e indicadores para evaluar el funcionamiento de un sistema de recursos hídricos, en curso sobre Modelos de Gestión de Sistemas de Recursos Hídricos.*
- García, O.; Morell, I.; Ballesteros, B. and Renau, A. (2022). *Determination of the water flow velocity by means of hydrogeochemical techniques applied to a MAR (managed aquifer recharge) site in a salinized aquifer with intergranular porosity (Plana de Castellón-Spain).* *Boletín Geológico y Minero*, 133(1), 18.
- González, L. (2021). *Causas y efectos de la escasez hídrica en la comuna de Tiltil, 2008-2020.* Universidad de Chile.

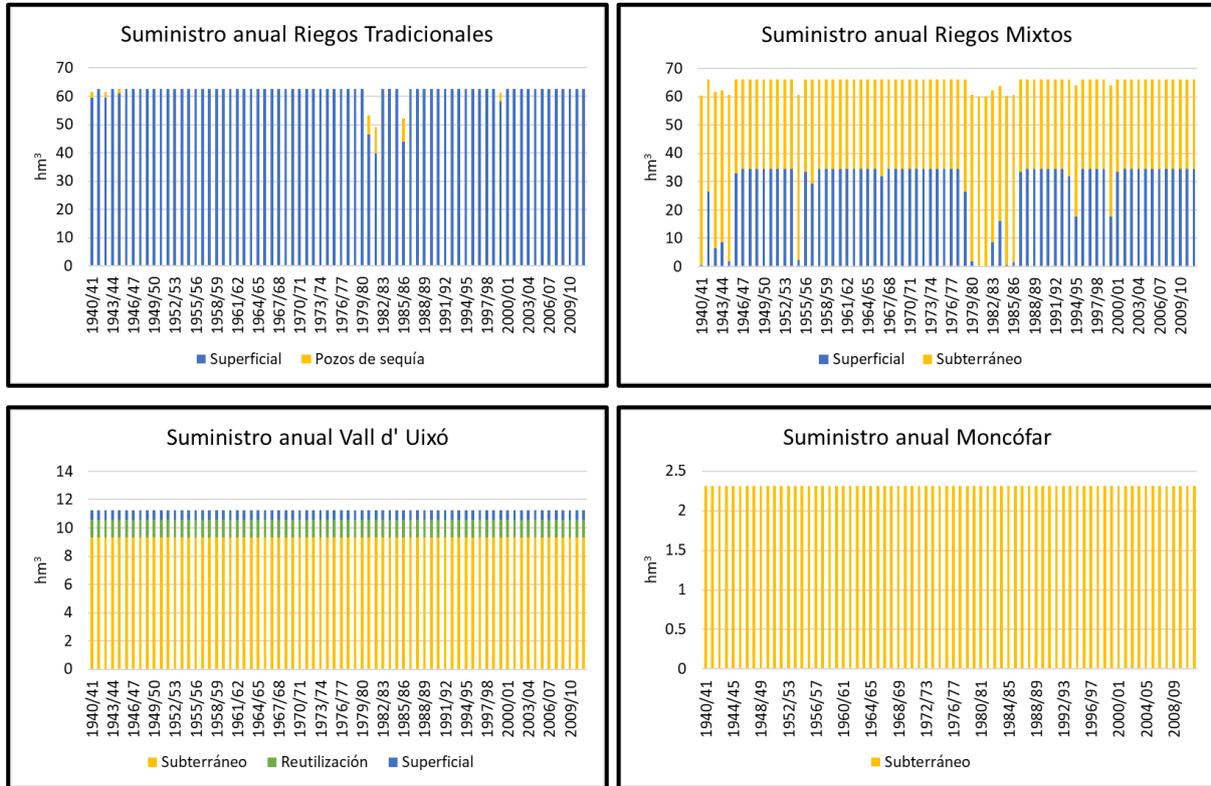
- Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos. (2012). *Documento técnico de referencia para la modelación y análisis del sistema de explotación Mijares*.
- iagua. (2019). *Nueva herramienta de AQUATOOL que facilita la gestión de recursos hídricos*.
- Iturria, I.; López, M.; Gómez, U.; Campo, M.; Giménez, R.; Alvarez, J. y Robles, C. (2019). *Evaluación de sondas capacitivas comerciales y bajo coste para estimar la humedad. X Congreso Ibérico de Agroingeniería, 8*.
- Macian, H.; Pulido, M. y Escriva, A. (2021). *Balance hídrico actual y futuro en las cuencas en España, retos y estrategias de adaptación. In Inundaciones y sequías, análisis multidisciplinar para mitigar el impacto de los fenómenos climáticos extremos, 937–960*.
- Martínez, D. (2021). *La reutilización en España, herramienta para la prevención de la sequía y el equilibrio hídrico. Inundaciones y Sequías: Análisis Multidisciplinar Para Mitigar El Impacto de Los Fenómenos Climáticos Extremos, 591–609*.
- Ministerio de Medio Ambiente. (2007). *Real Decreto 125/2007, de 2 de febrero, por el que se fija el ámbito territorial de las demarcaciones hidrográficas*. BOE.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2023a). *Real Decreto 35/2023, de 24 de enero, por el que se aprueba la revisión de los planes hidrológicos de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Occidental, Guadalquivir, Ceuta, Melilla, Segura y Júcar, y de la parte española de las demarcaciones hidrográficas del Cantábrico Oriental, Miño-Sil, Duero, Tajo, Guadiana y Ebro*. BOE, 19510–21315.
- Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2023b, February 24). *Base de datos de los espacios protegidos Red Natura 2000 de España*. [https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/BDN\\_CNTRYES.aspx](https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/BDN_CNTRYES.aspx).
- Palacios, T. (2022). *The abandonment of traditional agricultural areas and its impact of the hydrological response of a Mediterranean basin under semiarid climate conditions. Case study of the Guadalest watershed, southeastern Spain*. Universidad de Alicante.



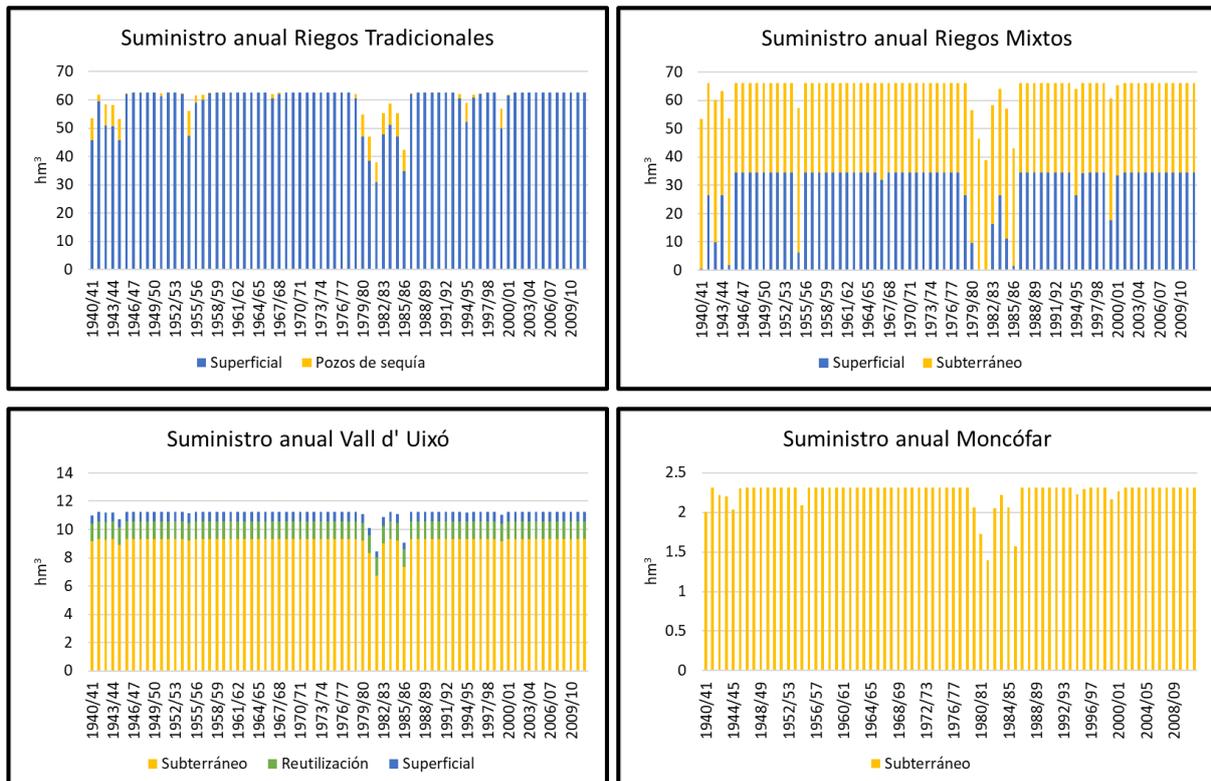
- Paredes, J. y Solera, A. (2020). *Informe técnico sobre la situación actual de los riegos de la Vall d'Uixó y su consideración en el ámbito del plan hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar*.
- Paredes, J.; Solera, A. y Andreu, J. (2008). *Reglas de operación para sistemas multiembalse, combinando métodos heurísticos y redes de flujo*. *Ingeniería Hidráulica En México*, 14.
- Ruiz, V. (2020). *Estimación del impacto del cambio global sobre el riesgo de sequía en el sureste de España: Evaluación y pronóstico sobre los recursos hídricos y el uso del agua*. Universidad de Murcia.
- Solera, A., Paredes, J. y Andreu, J. (2015). *AQUATOOL +, entorno de desarrollo de sistemas de ayuda a la decisión en materia de planificación de la gestión de cuencas hidrográficas incluyendo utilización conjunta y criterios de calidad de aguas*.
- Torres, F. (2021). *Análisis de la gestión del sistema de recursos hídricos de la cuenca del Mijares y estimación de excedentes para el interfluvio Mijares-Palancia*. Universidad Politécnica de Valencia.

## 13. Anexos

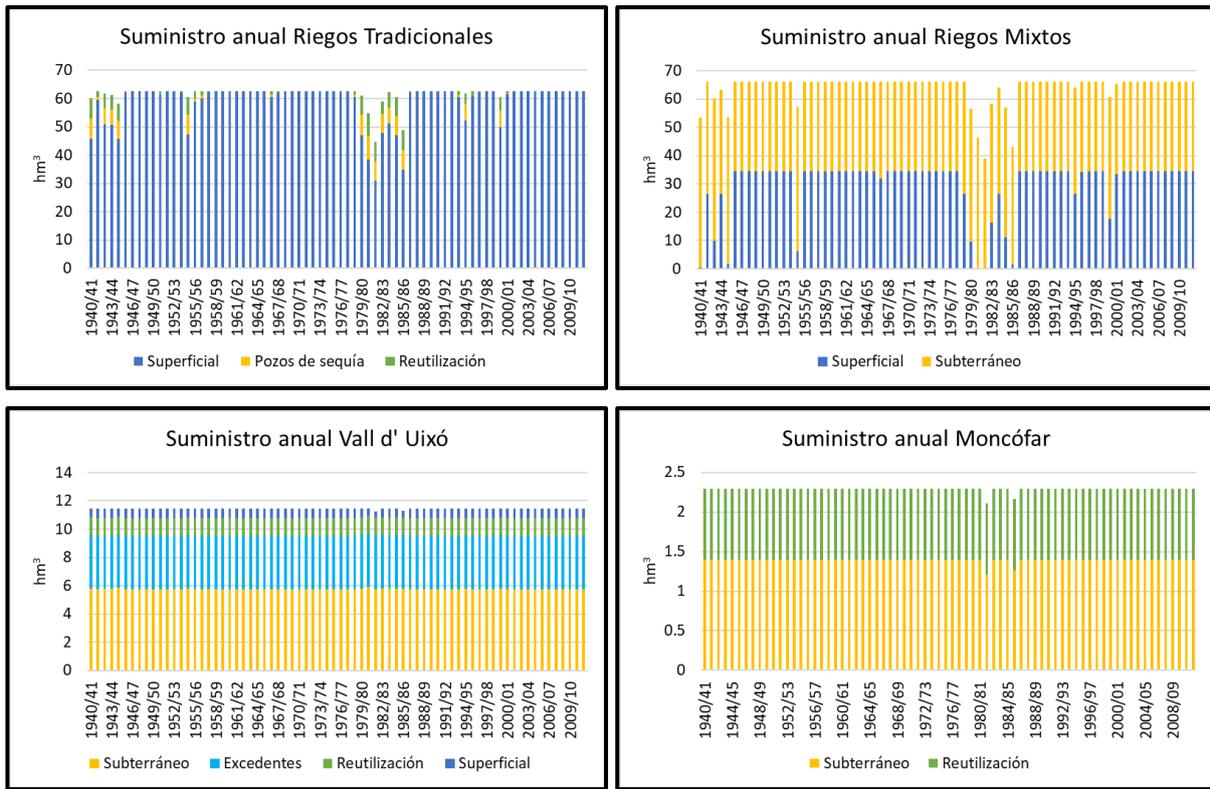
### 13.1. Suministros en el "Escenario PHJ"



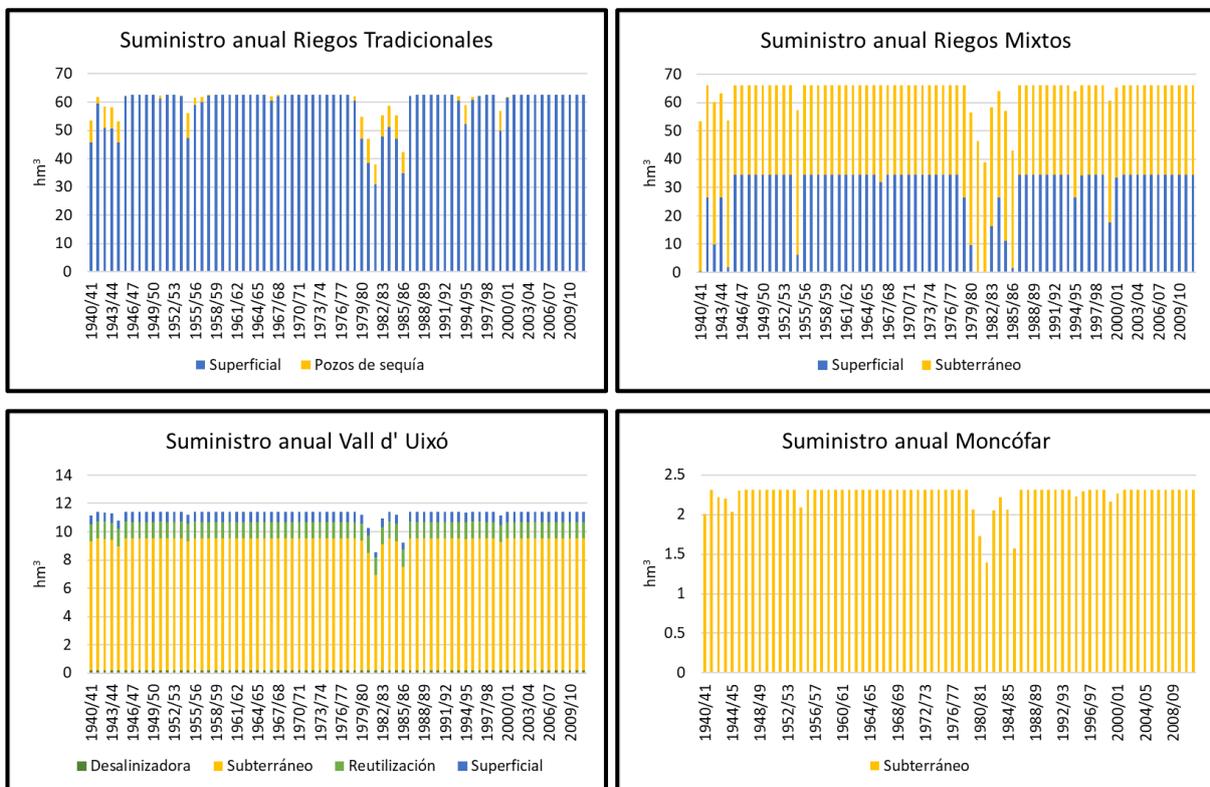
### 13.2. Suministros en el "Escenario Base"



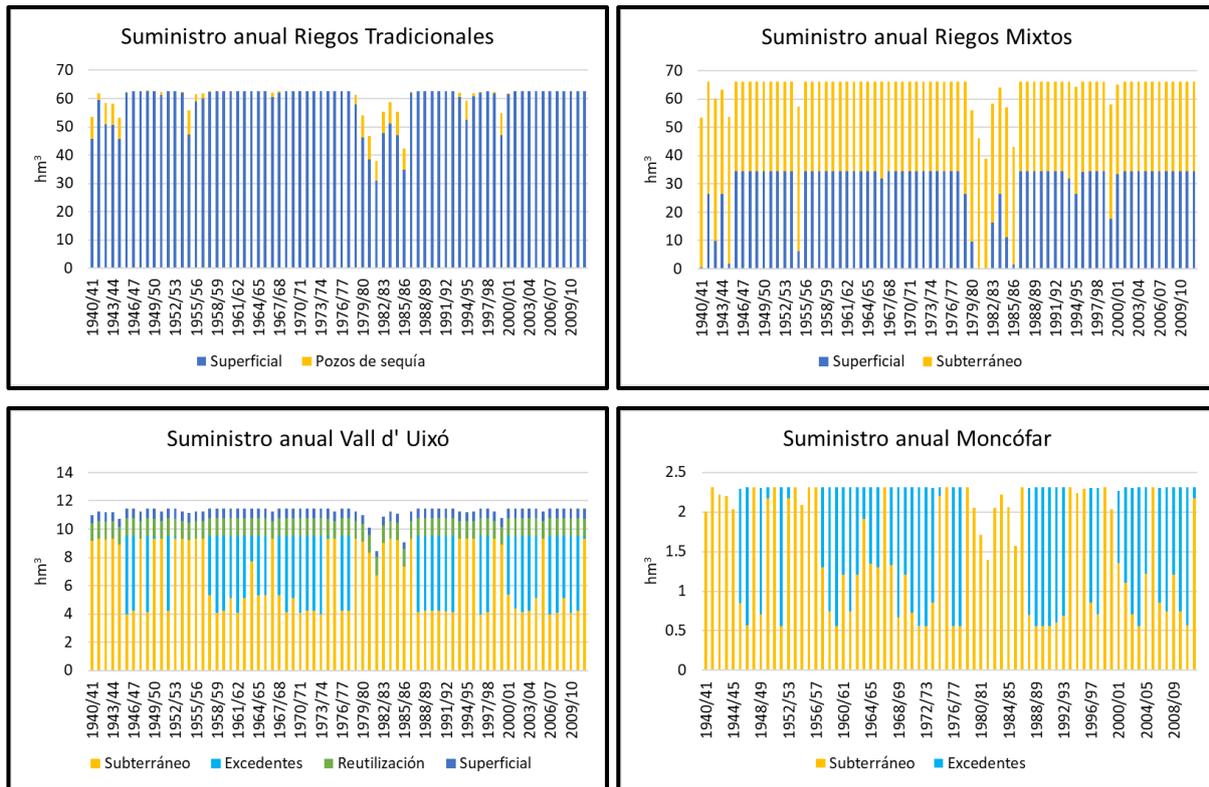
### 13.3. Suministros en el “Escenario Base + Reutilización”



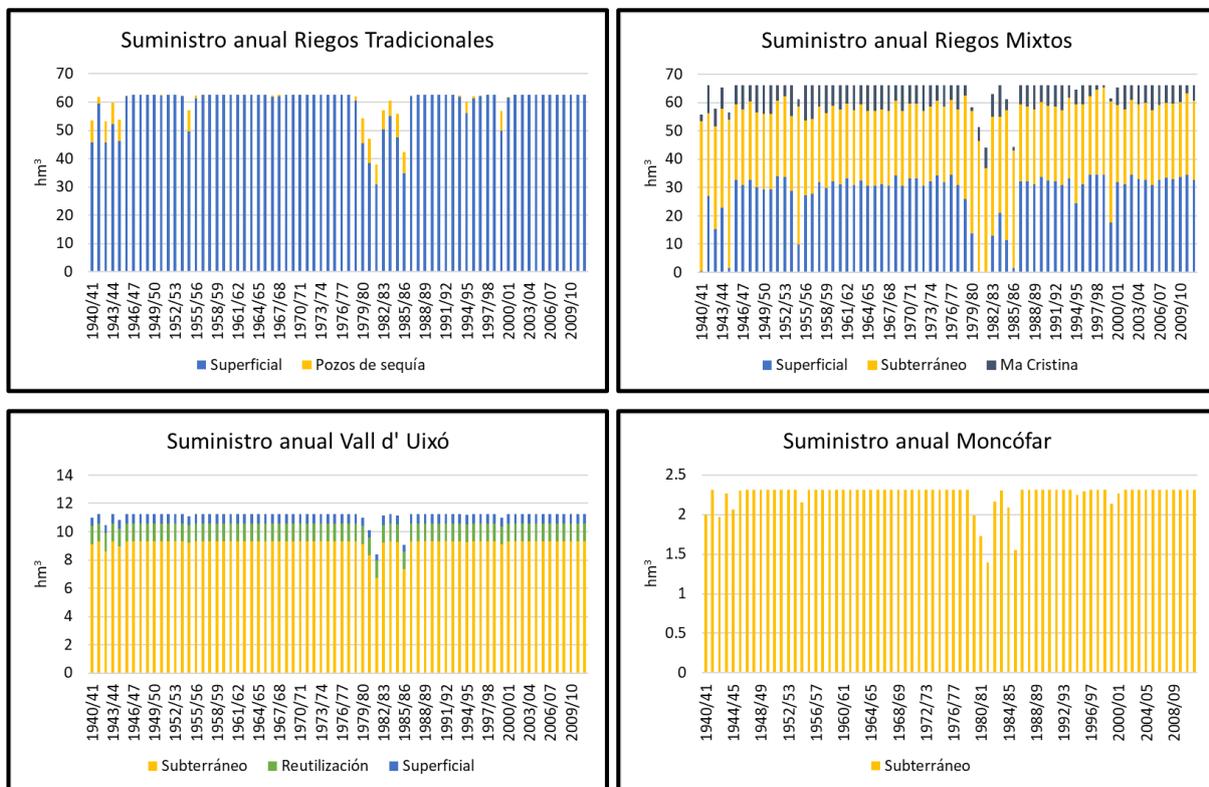
### 13.4. Suministros en el “Escenario Base + Desalinización”



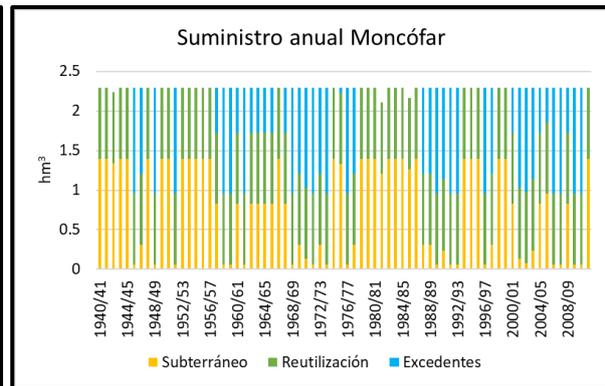
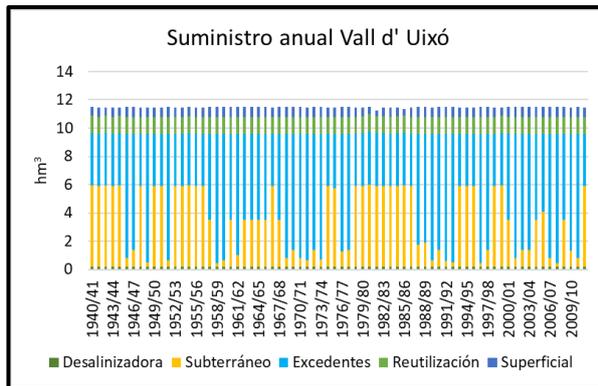
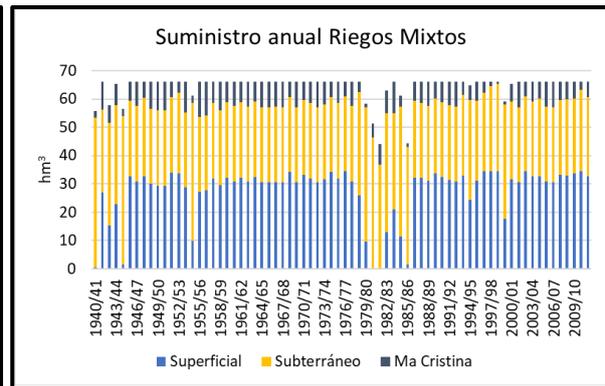
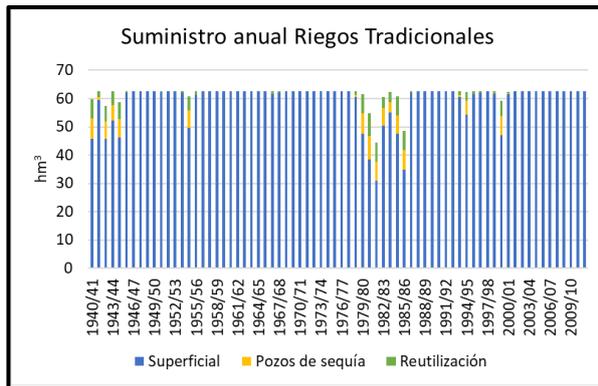
### 13.5. Suministros en el "Escenario Base + Balsa"



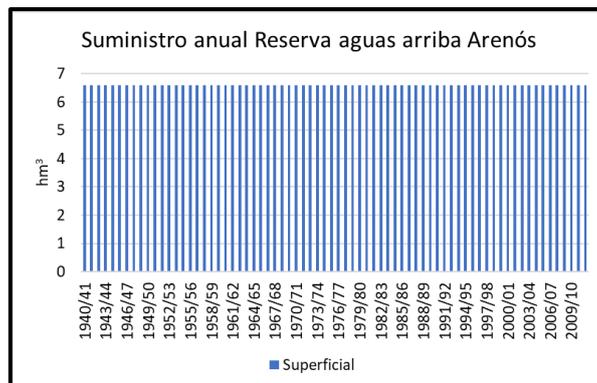
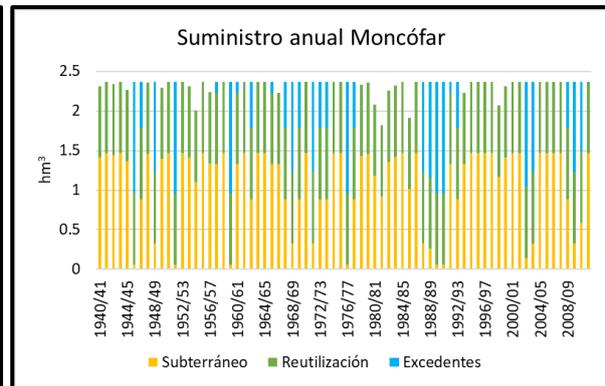
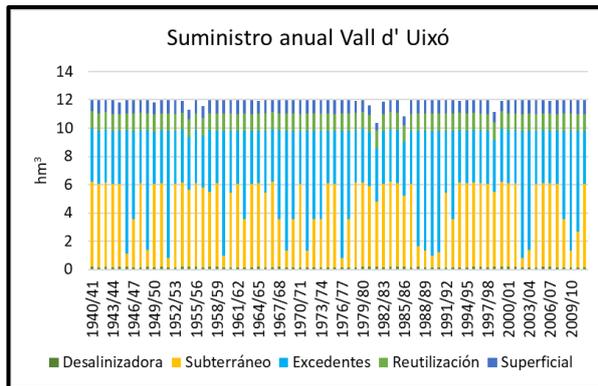
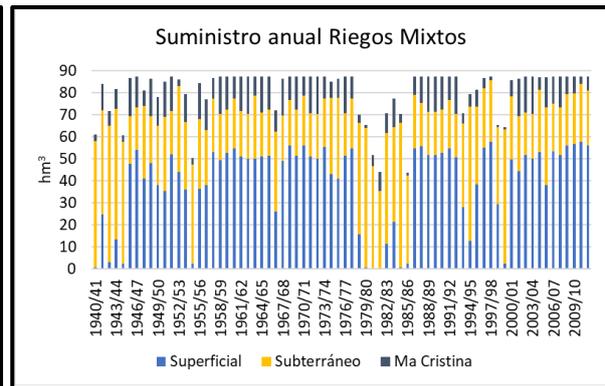
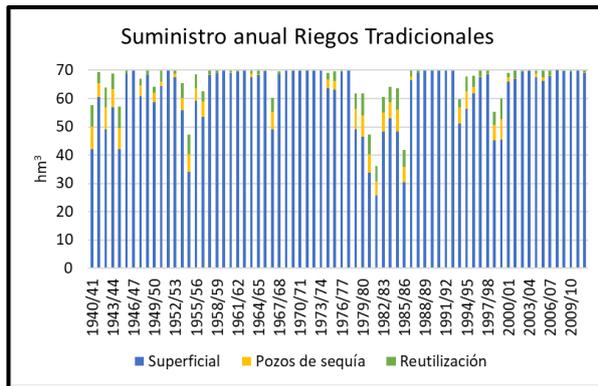
### 13.6. Suministros en el "Escenario Base + MC"



### 13.7. Suministros en el “Escenario Base + Medidas”



### 13.8. Suministros en el “Escenario Asignaciones + Medidas”



### 13.9. Resumen de resultados

Parámetro		Unidad	Escenario							
			PHJ	Base	Base +				Base + Medidas	Asignaciones + Medidas
					Reutilización	Desalinización	Balsa	MC		
Embalse de Arenós	Vertidos	hm <sup>3</sup> /año	1.62	1.62	1.62	1.62	1.59	1.62	1.57	1.17
Embalse de Schar	Vertidos	hm <sup>3</sup> /año	2.1	2.1	2.1	2.1	2.09	2.1	2.08	1.65
Embalse de María Cristina	Vertidos	hm <sup>3</sup> /año	3.15	3.15	3.15	3.15	3.15	3.04	3.03	2.95
3 Embalses	Vertidos	hm <sup>3</sup> /año	6.87	6.87	6.87	6.87	6.83	6.76	6.68	5.77
Embalses Arenós y Schar	Promedio mensual	hm <sup>3</sup> /mes	68.49	70.04	70.04	70.04	68.87	71.10	70.23	55.74
	Máximo	hm <sup>3</sup>	106.50	106.50	106.50	106.50	106.50	106.50	106.50	106.50
	Nº llenado	veces	101	101	101	101	99	102	100	58
	Mínimo	hm <sup>3</sup>	3.90	9.93	9.93	9.93	9.63	9.93	9.59	7.31
	Nº vaciado	veces	15	0	0	0	0	0	0	0
Suministro UDA Riegos Tradicionales	Superficial Mijares	hm <sup>3</sup> /año	61.62	59.00	59.00	59.00	58.90	59.25	59.18	61.71
	Pozos de sequía	hm <sup>3</sup> /año	0.47	1.71	1.36	1.71	1.75	1.53	1.29	2.29
	Reutilización	hm <sup>3</sup> /año	0.00	0.00	1.38	0.00	0.00	0.00	1.26	2.43
Suministro UDA Cota 220	Superficial Mijares	hm <sup>3</sup> /año	4.54	4.72	4.72	4.72	4.72	4.78	4.77	9.48
	Subterráneo	hm <sup>3</sup> /año	8.47	7.95	7.95	7.95	7.95	7.90	7.91	7.59
Suministro UDA Cota 100	Superficial Mijares	hm <sup>3</sup> /año	17.85	18.56	18.56	18.56	18.53	18.77	18.73	24.27
	Subterráneo	hm <sup>3</sup> /año	22.74	20.97	20.97	20.97	20.96	20.78	20.81	19.34
Suministro UDA María Cristina	Superficial Mijares	hm <sup>3</sup> /año	6.12	6.37	6.37	6.37	6.36	4.21	4.09	5.48
	Subterráneo	hm <sup>3</sup> /año	5.58	5.53	5.53	5.53	5.54	1.39	1.39	4.31
	Superficial embalse MC	hm <sup>3</sup> /año	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.74	6.86	10.47
Suministro UDA Vall d'Uixó	Superficial San José	hm <sup>3</sup> /año	0.70	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.68	0.90
	Subterráneo	hm <sup>3</sup> /año	9.30	9.21	5.77	9.20	6.55	9.20	3.29	4.52
	Reutilización	hm <sup>3</sup> /año	1.28	1.28	1.28	1.24	1.28	1.28	1.24	1.27
	Desalinización	hm <sup>3</sup> /año	0.00	0.00	0.00	0.18	0.00	0.00	0.18	0.15
	Excedentes Mijares	hm <sup>3</sup> /año	0.00	0.00	3.76	0.00	2.79	0.00	6.11	5.07
Suministro UDA Moncófar	Subterráneo	hm <sup>3</sup> /año	2.30	2.24	1.38	2.24	1.43	2.24	0.78	1.09
	Reutilización	hm <sup>3</sup> /año	0.00	0.00	0.91	0.00	0.00	0.00	0.91	0.92
	Excedentes Mijares	hm <sup>3</sup> /año	0.00	0.00	0.00	0.00	0.81	0.00	0.61	0.34
Suministro Reservas	Cabecera Arenós	hm <sup>3</sup> /año	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	6.60

Parámetro		Unidad	Escenario							
			PHJ	Base	Base +				Base + Medidas	Asignaciones + Medidas
					Reutilización	Desalinización	Balsa	MC		
Acuífero Plana de Castelló	Bombeo	hm <sup>3</sup> /año	37.26	36.16	35.81	36.16	36.20	31.60	31.40	33.53
	Recarga neta	hm <sup>3</sup> /mes	2.53	2.68	2.70	2.68	2.65	2.69	2.68	1.98
Acuífero Azuébar - Vall d'Uixó	Bombeo	hm <sup>3</sup> /año	11.60	11.45	7.15	11.44	7.98	11.44	4.07	5.61
	Recarga neta	hm <sup>3</sup> /mes	-0.76	-0.74	-0.39	-0.74	-0.54	-0.74	-0.21	-0.33
Energía eléctrica producida	7 CH	GWh/año	82.99	82.80	82.80	82.80	82.77	82.78	82.78	77.30
Garantía UDA Riegos Tradicionales	Fallos a 1A	veces	0	0	0	0	0	0	0	0
	Fallos a 2A	veces	0	0	0	0	0	0	0	1
	Fallos a 10A	veces	0	7	0	7	7	6	0	10
	Fallos totales	veces	0	7	0	7	7	6	0	11
	Déficit promedio	hm <sup>3</sup> /año	0.51	1.89	0.85	1.89	1.95	1.82	0.87	3.47
	Máximo déficit A	%	21.41	39.39	28.76	39.39	39.41	39.53	28.89	48.39
	Máximo déficit 2A	%	36.28	64.16	41.31	64.16	64.59	64.47	41.38	80.87
	Máximo déficit 10A	%	52.74	139.12	75.35	139.12	141.77	133.76	71.73	175.02
Garantía UDA Cota 220	Fallos a 1A	veces	0	0	0	0	0	0	0	1
	Fallos a 2A	veces	0	0	0	0	0	0	0	1
	Fallos a 10A	veces	0	6	6	6	6	5	5	10
	Fallos totales	veces	0	6	6	6	6	5	5	12
	Déficit promedio	hm <sup>3</sup> /año	0.00	0.34	0.34	0.34	0.35	0.33	0.33	1.25
	Máximo déficit A	%	0.1	39.91	39.91	39.91	39.93	40.04	40.02	55.62
	Máximo déficit 2A	%	0.2	65.67	65.67	65.67	66.1	65.97	65.7	97.22
	Máximo déficit 10A	%	0.2	132.65	132.65	132.65	134.18	125.35	123.15	227.33
Garantía UDA Cota 100	Fallos a 1A	veces	0	0	0	0	0	0	0	1
	Fallos a 2A	veces	0	0	0	0	0	0	0	1
	Fallos a 10A	veces	0	6	6	6	6	5	5	10
	Fallos totales	veces	0	6	6	6	6	5	5	12
	Déficit promedio	hm <sup>3</sup> /año	0.00	1.05	1.05	1.05	1.09	1.04	1.05	3.18
	Máximo déficit A	%	0.21	40.24	40.24	40.24	40.25	40.37	40.36	55.91
	Máximo déficit 2A	%	0.42	66.2	66.2	66.2	66.62	66.5	66.24	97.72
	Máximo déficit 10A	%	0.42	133.33	133.33	133.33	134.88	125.93	123.9	227.81

Parámetro		Unidad	Escenario							
			PHJ	Base	Base +				Base + Medidas	Asignaciones + Medidas
					Reutilización	Desalinización	Balsa	MC		
Garantía UDA María Cristina	Fallos a 1A	veces	0	0	0	0	0	0	0	1
	Fallos a 2A	veces	5	2	2	2	2	0	0	2
	Fallos a 10A	veces	15	11	11	11	11	0	0	24
	Fallos totales	veces	20	13	13	13	13	0	0	27
	Déficit promedio	hm <sup>3</sup> /año	0.90	0.70	0.70	0.70	0.70	0.25	0.27	2.05
	Máximo déficit A	%	46.83	46.55	46.55	46.55	46.55	34.93	34.93	58.75
	Máximo déficit 2A	%	93.66	93.08	93.08	93.08	93.08	37.13	37.13	86.84
	Máximo déficit 10A	%	279.59	218.74	218.74	218.74	218.78	62.28	69.07	261.24
Garantía UDA Vall d'Uixó	Fallos a 1A	veces	0	0	0	0	0	0	0	0
	Fallos a 2A	veces	0	0	0	0	0	0	0	0
	Fallos a 10A	veces	0	0	0	0	0	0	0	0
	Fallos totales	veces	0	0	0	0	0	0	0	0
	Déficit promedio	hm <sup>3</sup> /año	0.22	0.33	0.01	0.20	0.20	0.34	0.01	0.08
	Máximo déficit A	%	1.93	26.29	2.04	25.25	26.31	26.41	1.93	13.52
	Máximo déficit 2A	%	3.86	37.87	2.04	35.95	38.22	38.16	1.93	16.56
	Máximo déficit 10A	%	19.3	77.85	3.49	69.1	77.4	76.24	3.23	26.8
Garantía UDA Moncófar	Fallos a 1A	veces	0	0	0	0	0	0	0	0
	Fallos a 2A	veces	0	0	0	0	0	0	0	0
	Fallos a 10A	veces	0	5	0	5	5	5	0	0
	Fallos totales	veces	0	5	0	5	5	5	0	0
	Déficit promedio	hm <sup>3</sup> /año	0.00	0.06	0.00	0.06	0.06	0.06	0.01	0.04
	Máximo déficit A	%	0	39.06	7.61	39.06	39.06	39.19	7.7	22.76
	Máximo déficit 2A	%	0	64.11	7.87	64.11	64.51	64.42	8	34.85
	Máximo déficit 10A	%	0	130.93	13.57	130.93	132.49	125.45	13.48	63.32
Déficit Ponderado	Riegos Tradicionales	hm <sup>3</sup> /año	0.51	1.89	0.85	1.89	1.95	1.82	0.87	3.47
	Cota220, Cota100 y MC	hm <sup>3</sup> /año	0.17	0.85	0.85	0.85	0.87	0.75	0.76	2.48
	Vall d'Uixó y Moncófar	hm <sup>3</sup> /año	0.18	0.28	0.01	0.18	0.18	0.29	0.01	0.07
Déficit Ponderado relacionado con la demanda anual	Riegos Tradicionales	%	0.81%	3.02%	1.36%	3.02%	3.11%	2.91%	1.39%	4.96%
	Cota220, Cota100 y MC	%	0.26%	1.28%	1.28%	1.28%	1.32%	1.13%	1.15%	2.85%
	Vall d'Uixó y Moncófar	%	1.33%	2.06%	0.04%	1.29%	1.30%	2.10%	0.04%	0.48%