

Trabajo Fin de Máster

Análisis de la gestión del sistema de recursos hídricos de la cuenca del Mijares y estimación de excedentes para el interfluvio Mijares-Palancia

Intensificación:

ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Autor:

FRANCISCO JOSÉ TORRES MEDINA

Tutor:

DR. JAVIER PAREDES ARQUIOLA

Cotutor/es:

DR. ABEL SOLERA SOLERA

MAYO, 2021



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Resumen del Trabajo de Fin de Máster

Datos del proyecto

Título del TFM en español: ANÁLISIS DE LA GESTIÓN DEL SISTEMA DE RECURSOS HÍDRICOS DE LA CUENCA DEL MIJARES Y ESTIMACIÓN DE EXCEDENTES PARA EL INTERFLUVIO MIJARES-PALANCIA

Título del TFM en inglés: ANALYSIS OF THE WATER RESOURCE MANAGEMENT OF THE MIJARES BASIN AND ESTIMATION OF SURPLUSES FOR THE MIJARES-PALANCIA INTERFLUVIUM

Título del TFM en Valenciano: ANÀLISI DE LA GESTIÓ DEL SISTEMA DE RECURSOS HÍDRICS DE LA CONCA DEL MILLARS I ESTIMACIÓ D'EXCEDENTS PER A L'INTERFLUVI MILLARS-PALANCIA

Alumno: FRANCISCO JOSÉ TORRES MEDINA

Tutor: JAVIER PAREDES ARQUIOLA

Cotutor/es: ABEL SOLERA SOLERA

Fecha de Lectura: JUNIO, 2021

Resumen

En español

Actualmente, alrededor del mundo se vive un periodo de incertidumbre climática en el que entre las pocas certezas que se tienen es que, en mayor o menor medida, los recursos hídricos serán cada vez más escasos y los eventos extremos hidrometeorológicos serán más intensos y frecuentes, no solo en relación con las inundaciones sino también a las sequías.

En este contexto, distintos enfoques en la gestión de recursos hídricos empiezan a tomar preponderancia de cara a la optimización del recurso, para hacer una lucha frontal al cambio climático y sus efectos adversos.

Uno de los enfoques dentro de la gestión integrada de recursos hídricos, es la gestión de uso conjunto, que incorpora usos no convencionales para optimizar el recurso tales como la reutilización y la desalinización. Este enfoque ha ido tomando cada vez más importancia en España en los últimos años, de manera que ha sido reflejado en la memoria del Esquema de Temas Importantes (ETI) del Tercer Ciclo de Planificación Hidrología 2021-2027 de España.

España se configura como uno de los países más afectado a nivel mundial en cuanto al impacto del cambio climático en el recurso hídrico, y en particular la zona costera de la vertiente mediterránea. En esta región se encuentra el Sistema de Explotación Mijares-Plana de Castellón, una región del territorio que desde hace décadas ha presentado problemas de sobreexplotación de aguas subterráneas (detrimento del estado cuantitativo) y empobreciendo de la calidad de aguas subterráneas del acuífero de la Plana de Castellón

(relacionado a la cuenca del río Mijares y al Interfluvio Mijares-Palancia).

Esta investigación se enmarca precisamente en analizar la factibilidad de una de las medidas que permitan mejorar el estado actual, en términos de cantidad y calidad, del acuífero de la Plana de Castellón en la zona correspondiente al Interfluvio Palancia-Mijares: el aprovechamiento de los recursos excedentarios del sistema Mijares.

A través de la herramienta computacional utilizando el software AQUATOOL, se ha elaborado un modelo híbrido superficial - subterráneo con los principales elementos del sistema Mijares (de donde se aprovecharán los recursos excedentarios) y del sistema de la Vall d'Uixó, que es en donde se documenta la mayor sobreexplotación de recursos hídricos subterráneos, inclusive registrando niveles piezométricos de hasta -50 msnm.

El uso de esta herramienta permite, en primera instancia, una recreación simplificada de la operación de distintos elementos del sistema (ríos, estructuras y demandas) cuya validez es demostrada por su calibración superficial comparando con registro históricos de volúmenes almacenados de los embalses Arenós y Sichar y calibración subterránea comparando con niveles piezométricos históricos en la zona.

En segunda instancia, la recreación de escenarios en los que se evalúen distintas medidas sobre el sistema: nuevos caudales ecológicos, nuevas características de embalses, distintas reglas de operación para los volúmenes excedentarios y nuevos posibles usos.

El análisis de los resultados de todos estos escenarios permite comprender que el aprovechamiento de los volúmenes excedentarios del sistema Mijares es una medida factible para la recuperación del acuífero de la Plana de Castellón, resaltando que el suministro anual en el canal de excedencias (y no solo invernal) podría conllevar mejoras importantes en los niveles del acuífero. Además, un uso complementario de los volúmenes almacenados en la Balsa Belcaire hacia la UDA Moncofa podría mejorar significativamente la calidad al reducir la intrusión salina y recuperación de niveles piezométricos entre 30 a 50 metros en zonas con mayor abatimiento. El último escenario analizado demuestra que, de no contar con una regla de operación adecuada, la garantía de la UDA Riegos Tradicionales podría verse comprometida por encima de valores aceptables.

Habiéndose demostrado el impacto del empleo de volúmenes excedentarios en los recursos hídricos del interfluvio Palancia-Mijares a través de la modelación computacional, se espera impulsar la continuidad a los estudios híbridos superficiales-subterráneos para este y otros sistemas hídricos y, en particular, se espera que con esta investigación se puedan realizar estudios a mayor profundidad sobre la factibilidad económica de la medida, a fin de poder recuperar el buen estado del Acuífero de la Plana de Castellón.

En inglés

Currently, around the world there is a period of climatic uncertainty in which among the few certainties that exist is that, to a greater or lesser extent, water resources will be increasingly scarce and extreme hydrometeorological events will be more intense and frequent, not only in relation to floods but also to droughts.

In this context, different approaches in the management of water resources begin to take precedence in the face of optimizing the resource, to make a frontal fight against climate change and its adverse effects.

One of the approaches within the integrated management of water resources is joint use management, which incorporates unconventional uses to optimize the resource such as reuse and desalination. This approach has become increasingly important in Spain in recent years, so that it has been reflected in the memory of the Scheme of Important Issues (ETI, in spanish) of the Third Cycle of Hydrology Planning 2021-2027 of Spain.

Spain is configured as one of the countries most affected worldwide in terms of the impact of climate change on water resources, and in particular the coastal area of the Mediterranean side. In this region is the Mijares-Plana de Castellón Exploitation System, a region of the territory that for decades has presented problems of groundwater overdraft (detrimental to the quantitative status) and impoverishing the quality of groundwater in La Plana de Castellón aquifer (related to the Mijares river basin and the Mijares-Palancia Interfluvium).

This research is framed precisely in analyzing the feasibility of one of the measures that allow improving the current state, in terms of quantity and quality, of La Plana de Castellón aquifer in the area corresponding to the Palancia-Mijares Interfluvium: the use of resources surpluses of the Mijares system.

Through the computational tool using the AQUATOOL software, a hybrid surface-underground model has been developed with the main elements of the Mijares system (from which surplus resources will be used) and La Vall d'Uixó system, which is where the greatest overdraft of underground water resources is documented, even registering piezometric levels of up to -50 meters above sea level.

The use of this tool allows, in the first instance, a simplified recreation of the operation of different elements of the system (rivers, structures and demands) whose validity is demonstrated by its surface calibration comparing with historical records of stored volumes of Arenós and Sichar reservoirs. and underground calibration comparing with historical piezometric levels in the area.

In the second instance, the recreation of scenarios in which different measures on the system are evaluated: new ecological flows, new characteristics of reservoirs, different operating rules for surplus volumes and new possible uses.

The analysis of the results of all these scenarios allows us to understand that the use of the excess volumes of the Mijares system is a feasible measure for the recovery of the Plana de Castellón aquifer, highlighting that the annual supply in the excess channel (and not only in winter) could lead to significant improvements in aquifer levels. In addition, a complementary use of the volumes stored in the Belcaire Raft towards the Moncofa UDA (Agricultura Demand Unit, in spanish) could significantly improve quality by reducing saline intrusion and recovery of piezometric levels between 30 to 50 meters in areas with greater depletion. The last scenario analyzed shows that, in the absence of an adequate operating rule, the UDA Riegos Tradicionales guarantee could be compromised above acceptable values.

Having demonstrated the impact of the use of surplus volumes in the water resources of the Palancia-Mijares interfluvium through computational modeling, it is expected to promote the continuity of hybrid

surface-underground studies for this and other water systems and, in particular, it is expected that with this research more in-depth studies can be carried out on the economic feasibility of the measure, in order to recover the good condition of La Plana de Castellón Aquifer.

Palabras clave español: Gestión integrada de recursos hídricos, uso conjunto, balance hídrico, cambio climático, sobreexplotación de aguas subterráneas.

Palabras clave inglés: Integrated water resource management, joint use, water balance, climate change, groundwater overdraft.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Francisco José Torres Medina

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Dedicatoria

*A Dios.
A mis padres, por haberme permitido elegir mi camino.
A mis hermanos, por haberme guiado.
A la comunidad científica, por haberme motivado.*



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

Francisco José Torres Medina

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Agradecimientos.

En primer lugar, a mi familia, quienes durante mi periodo de maestrando estuvieron velando por mí a la distancia y apoyándome incondicionalmente.

Para la realización de este trabajo, agradezco a mi tutor Dr. Javier Paredes Arquiola y a mi co-tutor, Dr. Abel Solera Solera, por las enseñanzas impartidas, por la motivación brindada para realizar este trabajo y principalmente por el tiempo que me han brindado en todo este trayecto.

En segundo lugar, agradezco a las autoridades de la Universidad Politécnica de Valencia, en particular a D. Miguel Sánchez Pradas por haber abogado por mí cuando más lo necesitaba frente a PRONABEC para continuar mis estudios en el máster.



■ ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	16
1.1. OBJETIVOS	17
2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN MIJARES – PLANA DE CASTELLÓN	17
2.1. COMPONENTES DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN	18
2.1.1. Infraestructuras	18
2.1.1.1. Embalses	18
2.1.1.2. Conducciones de transporte	19
2.1.2. Recursos hídricos	21
2.1.2.1. Recursos hídricos totales	21
2.1.2.2. Recursos hídricos subterráneos	21
2.1.3. Relaciones río-acuífero	22
2.1.4. Caudales ecológicos	23
2.1.5. Usos y demandas	24
2.1.5.1. Unidades de demanda urbana	24
2.1.5.2. Unidades de demanda agrícola	25
2.1.5.3. Unidades de demanda industrial y recreativa	26
2.2. PROBLEMAS DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN	27
2.2.1. Problemas principales	27
2.2.2. Problemas secundarios	27
2.3. DESCRIPCIÓN TOPOLÓGICA DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN	28
3. METODOLOGÍA	31
4. RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE ESTUDIOS ANTECEDENTES	32
4.1. INSTRUCCIÓN DE PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA (IPH-2008)	32
4.2. PLAN HIDROLÓGICO DE LA DEMARCACIÓN HIDROGRÁFICA DEL JÚCAR 2015-2021	34
4.2.1. Generalidades	34
4.2.2. Anexo 06: Sistemas de explotación y balances	34
4.3. ESQUEMAS DE TEMAS IMPORTANTES 2022-2027	37
4.4. EVALUACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS EN EL SISTEMA HIDROGRÁFICO MIJARES – LA PLANA. EFECTOS BAJO UN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO	38
4.5. TRABAJO DE FIN DE MÁSTER: ESTUDIO DE REUTILIZACIÓN INTEGRADA DE LAS AGUAS REGENERADAS EN EL TRAMO FINAL DEL RÍO MIJARES (SEP,2017)	39
4.6. ITGE SERIE. MANUALES DE UTILIZACIÓN DE ACUÍFEROS. PLANAS DE CASTELLÓN Y SAGUNTO (1990)	40



■ ÍNDICE

5. ELECCIÓN DE MODELO DE SIMULACIÓN	41
5.1. WEAP	41
5.2. HYDRO-BID	41
5.3. SWAM	42
5.4. AQUARUS.....	43
5.5. WRAP TEXAS	44
5.6. AQUATOOL.....	45
6. MODELACIÓN Y CALIBRACIÓN DE RESULTADOS	45
6.1. MONTAJE DEL MODELO HÍBRIDO SUPERFICIAL-SUBTERRÁNEO	46
6.2. COMPONENTE SUBTERRÁNEO.....	48
6.2.1. Estudios antecedentes asociados	49
6.2.2. Discretización del acuífero en el modelo	50
6.2.3. Simulación y calibración del componente subterráneo	54
6.3. COMPONENTE SUPERFICIAL.....	60
7. GENERACIÓN DE ESCENARIOS	63
7.1. CONSIDERACIONES INICIALES.....	63
7.2. GENERACIÓN DE ESCENARIOS.....	64
7.2.1. Nuevo volumen de embalse Arenós.....	64
7.2.2. Presiones ambientales.....	65
7.2.3. Curvas de operación y suministro alternativo a Moncofa	67
7.2.4. Definición de escenarios.....	67
8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	68
8.1. VOLUMEN APORTADO DESDE EL SISTEMA MIJARES AL INTERFLUVIO Y EL EFECTO EN EL ACUÍFERO DE LA PLANA DE CASTELLÓN.....	75
8.2. EFECTO SOBRE LAS GARANTÍAS EN LAS DEMANDAS DEL MIJARES	76
8.3. OTRAS CONSIDERACIONES.....	78
9. CONCLUSIONES.....	80
10. RECOMENDACIONES	81
11. REFERENCIAS.....	82



■ ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de los embalses principales.	19
Tabla 2. Aportación acumulada a la red fluvial ($\text{hm}^3/\text{año}$) en régimen natural según modelo PATRICAL en el sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21.	21
Tabla 3. Recurso renovable zonal, restricciones ambientales y recurso disponible ($\text{hm}^3/\text{año}$) de las principales masas de agua subterráneas del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21.	22
Tabla 4: Demanda (hm^3) de las principales UDU del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21.	25
Tabla 5. Demandas (hm^3) de las principales UDA del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21.	26
Tabla 6. Demanda agraria total (hm^3) del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21.	26
Tabla 7. Demandas (hm^3) de las principales UDI del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21.	26
Tabla 8. Demanda (hm^3) recreativa del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21.	27
Tabla 9. Valores de eficiencias para regadío de IPH-2008.	33
Tabla 10. Unidades de demanda agraria consideradas	35
Tabla 11. Resumen de análisis de los resultados de los escenarios simulados	36
Tabla 12. Capacidad máxima de generación de EDARs	37
Tabla 13. Estaciones depuradoras analizadas	39
Tabla 14. EDARs utilizada para riego	39
Tabla 15. EDARs utilizadas para medio ambiente.	39
Tabla 16. Masas de agua subterránea en el Interfluvio Palancia-Mijares	48
Tabla 17. Piezómetros considerados para el análisis de calibración	54
Tabla 18. Clasificación de terrenos según su transmisividad [21]	56
Tabla 19. Clasificación de terrenos según su coeficiente de almacenamiento [21]	56
Tabla 20. Valores adoptados de transmisividad y coeficiente de almacenamiento.	59
Tabla 21. Tramos de río considerados para caudal ecológico	66
Tabla 22. Factores de modulación para caudales mínimos en el sistema de explotación	67
Tabla 23. Escenarios definitivos para analizar en el modelo	68
Tabla 24. Resumen del balance promedio de elementos principales en la zona del Mijares – Todos los escenarios.	69



■ ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 25. Resumen del balance promedio de elementos principales en la zona de La Vall d’Uixó – Todos los escenarios.....	70
Tabla 26. Resumen de garantías y análisis de intrusión salina – Todos los escenarios.....	71
Tabla 27. Caudales ecológicos y códigos para escenario 1	106



■ ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón respecto al resto de sistemas de explotación considerados en la CHJ. Elaboración propia.....	17
Figura 2. Principales embalses del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21.....	18
Figura 3: Estructuras de regulación en del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. ..	19
Figura 4. Conducciones de transporte principales del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21.	20
Figura 5. Canales, acequias y sequias del sistema de explotación [en amarillo]. Fuente: CHJ.....	20
Figura 6: Volumen del acuífero de la Plana de Castellón por encima del nivel mar para tres alternativas de operación del sistema.[6].....	22
Figura 7. Tipología de la relación río-acuífero en el sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21.	23
Figura 8. Localización de las masas de agua con caudales ecológicos en el sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón en el PHJ15/21. Fuente: PHJ 15/21.	23
Figura 9. UDU del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21.	24
Figura 10. UDA del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21.....	25
Figura 11. Desembocadura del río Mijares sin caudal ecológico. Fuente: www.cope.es.....	28
Figura 12. Topología del Sistema de Explotación Mijares- Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21.	29
Figura 13. Masas de agua subterránea incluidas en el modelo de simulación del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón.	30
Figura 14. UDA consideradas en el modelo de simulación del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21.	30
Figura 15. Aportación anual total en el modelo de simulación del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21	31
Figura 16. EDARs utilizadas para regeneración de aguas	35
Figura 17. Evolución del volumen depurado y reutilizado de las EDARs	38
Figura 18. WEAP – imagen referencial	41
Figura 19. HYDROBID – imagen referencial.....	42
Figura 20. SWAM – imagen referencial	43
Figura 21. AQUARIUS – imagen referencial.....	44
Figura 22. WRAP – imagen referencial.....	44
Figura 23. Aquatool (SIMGES) – imagen referencial	45
Figura 24. Esquema topológico en SIMGES del S.E. Mijares – Plana de Castellón del PHJ 2015-2021.....	46



■ ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 25. Configuración topológica final en SIMGES	48
Figura 26. Discretización del Acuífero de la Plana de Castellón basado en Varela (1983).	50
Figura 27. Distribución inicial de parámetros Tx, Ty y S	51
Figura 28. Análisis visual para elección de puntos de control (Caso Miramar)	53
Figura 29. Ubicación de piezómetro Miramar. Fuente. SIA Júcar.	53
Figura 30. Distribución espacial de piezómetros analizados	54
Figura 31. Zonificación del modelo según litología del IGME	55
Figura 32. Primeros resultados de calibración del modelo subterráneo (2 parámetros de control)	57
Figura 33. Zonificación según transmisividades del acuífero de la Plana de Castellón	57
Figura 34. Zonificación según coeficientes de almacenamiento del acuífero de la Plana de Castellón (según diversas fuentes)	58
Figura 35. Zonificación definitiva según transmisividades	58
Figura 36. Zonificación definitiva según coeficientes de almacenamiento	59
Figura 37. Resultados de calibración de modelo subterráneo - superficial en los dos puntos de control principales	60
Figura 38. Resultados y comparación de escenario actual (registros históricos) - Embalse Schar.	61
Figura 39. Resultados y comparación de escenario actual (registros históricos) - Embalse Arenós.	61
Figura 40. Resultados y comparación de escenario actual (registros históricos) - Embalse Schar + Arenós.	62
Figura 41. Comparación de garantías modeladas en la UDA Riegos Tradicionales	62
Figura 42. Extensión de canal cota 100 propuesto en el PHJ-15-21	64
Figura 43. Titular de noticia sobre Arenós. Fuente: elperiodicomediterraneo.com	64
Figura 44. Localización de las masas de agua con caudales ecológicos en el sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15-21	65
Figura 45. Caudales ecológicos considerados en el modelo	66
Figura 46. Comparación de niveles piezométricos mínimos entre escenario 0, 3A-Anual y 3A-Anual+M	74
Figura 47. Comparación de caudales litorales-Zona Vall d'Uixó/Moncofa entre escenario 0, 3A-Anual y 3A-Anual+M	74
Figura 48. Análisis cruzado de las entradas a la Balsa Belcaire y los valores piezométricos mínimos del acuífero en todos los escenarios	75



■ ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 49. Análisis cruzado de las entradas a la Balsa Belcaire y los valores de caudales de intercambio litoral en todos los escenarios	76
Figura 50. Análisis cruzado de las garantías de la UDA Riegos Tradicionales y las entradas a la Balsa Belcaire en todos los escenarios.....	77
Figura 51. Análisis cruzado de los suministros a riegos mixtos y las entradas a la Balsa Belcaire en todos los escenarios.....	77
Figura 52. Reglas de operación analizadas y volúmenes promedios mensuales de la suma de embalses Arenós y Schar.....	78
Figura 53. Análisis cruzado de la salida del sistema Mijares y los valores piezométricos mínimos del acuífero en todos los escenarios.....	79
Figura 54. Comparación de volúmenes embalsados entre el escenario 0 base y el histórico	102
Figura 55. Garantías actuales de los riegos tradicionales	102
Figura 56. Volúmenes asociados a la UDA de la Vall d'Uixó en escenario 0.....	103
Figura 57. Niveles piezométricos mínimos en escenario 0.....	103
Figura 58. Caudales litorales-Zona Vall d'Uixó/Moncofa en escenario 0	104
Figura 59. Variación de volumen de Balsa Belcaire	104
Figura 60. Tramos con caudales ecológicos contemplados en escenario 1 (en colores)	106
Figura 61. Comparación de volúmenes embalsados entre el escenario 0 y el 1	107
Figura 62. Comparación de niveles piezométricos mínimos entre escenario 0 y 1	107
Figura 63. Comparación de caudales litorales-Zona Vall d'Uixó/Moncofa entre escenario 0 y 1.	108
Figura 64. Comparación de volumen embalsado en Balsa Belcaire entre escenario 0 y 1	108
Figura 65. Asignación de toma de demanda de canal de derivación – Escenario 2	110
Figura 66. Curva de operación intermedia para excedentes – Escenario 2.....	110
Figura 67. Comparación de volúmenes embalsados entre el escenario 1 y el 2	111
Figura 68. Volúmenes asociados a la UDA de la Vall d'Uixó en el escenario 2.....	111
Figura 69. Comparación de niveles piezométricos mínimos entre escenario 0 y 2.....	112
Figura 70. Comparación de caudales litorales-Zona Vall d'Uixó/Moncofa entre escenario 0 y 2.	112
Figura 71. Comparación de volumen embalsado en Balsa Belcaire entre escenario 1 y 2	113
Figura 72. Curva de operación para excedentes – Escenario 3A	115
Figura 73. Comparación de volúmenes embalsados entre el escenario 3A y el 2	115
Figura 74. Volúmenes asociados a la UDA de la Vall d'Uixó en el escenario 3A.....	116
Figura 75. Caudales demandados por el canal de excedencias – Escenario 3A.....	118
Figura 76. Comparación de volúmenes embalsados entre el escenario 2 y el 3A-Anual	118



■ ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 77. Volúmenes asociados a la UDA de la Vall d'Uixó y Moncofa en el escenario 3A-Anual	119
Figura 78. Comparación de niveles piezométricos mínimos entre escenario 0, 3A y 3A-Anual... 119	
Figura 79. Comparación de caudales litorales-Zona Vall d'Uixó/Moncofa entre escenario 0, 3A y 3A-Anual..... 120	
Figura 80. Comparación de volumen embalsado en Balsa Belcaire entre escenario 2 y 3A-Anual	120
Figura 81. Volúmenes del canal de excedencias en el escenario 2 y 3A-Anual	121
Figura 82. Comparación de volúmenes embalsados entre el escenario 2 y el escenario 3A-Anual+M	123
Figura 83. Volúmenes asociados a la UDA de la Vall d'Uixó y Moncofa en el escenario 3A+Anual+M	124
Figura 84. Comparación de volumen embalsado en Balsa Belcaire entre escenario 2 y 3A-Anual+M	125
Figura 85. Curva de operación para excedentes – Escenario 3B..... 127	
Figura 86. Comparación de volúmenes embalsados entre el 2 y el escenario 3B	127
Figura 87. Volúmenes asociados a la UDA de la Vall d'Uixó en el escenario 3B..... 128	
Figura 88. Caudales demandados por el canal de excedencias – Escenario 3B..... 130	
Figura 89. Comparación de volúmenes embalsados entre el escenario 2 y el 3B-Anual..... 130	
Figura 90. Volúmenes asociados a la UDA de la Vall d'Uixó y Moncofa en el escenario 3B-Anual	131
Figura 91. Comparación de niveles piezométricos mínimos entre escenario 2, 3A-Anual y 3B-Anual	131
Figura 92. Comparación de volumen embalsado en Balsa Belcaire entre escenario 2 y 3B-Anual	132
Figura 93. Volúmenes del canal de excedencias en el escenario 2 y 3B-Anual	132
Figura 94. Curva de operación para excedentes – Escenario 3C-Anual	134
Figura 95. Comparación de volúmenes embalsados entre el escenario 2 y 3C-Anual	134
Figura 96. Volúmenes asociados a la UDA de la Vall d'Uixó y Moncofa en el escenario 3C-Anual	135
Figura 97. Comparación de niveles piezométricos mínimos entre escenario 0, 3A-Anual y 3C-Anual	135
Figura 98. Comparación de caudales litorales-Zona Vall d'Uixó/Moncofa entre escenario 0, 3A-Anual y 3C-Anual..... 136	



■ ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 99. Comparación de volumen embalsado en Balsa Belcaire entre escenario 2 y 3C-Anual	136
Figura 100. Volúmenes del canal de excedencias en el escenario 2 y 3C-Anual	137
Figura 101. Comparación de volúmenes embalsados entre el escenario 2 y Ad.....	139
Figura 102. Volúmenes asociados a la UDA de la Vall d'Uixó y Moncofa en el escenario Ad.....	139
Figura 103. Comparación de niveles piezométricos mínimos entre escenario 2 y Ad	140
Figura 104. Comparación de caudales litorales-Zona Vall d'Uixó/Moncofa entre escenario 2 y Ad	141
Figura 105. Comparación de volumen embalsado en Balsa Belcaire entre escenario 2 y Ad	141
Figura 106. Volúmenes del canal de excedencias en el escenario 2 y Ad	142



1. INTRODUCCIÓN

Actualmente, alrededor del mundo se vive un periodo de incertidumbre climática en el que entre las pocas certezas que se tienen es que, en mayor o menor medida, los recursos hídricos serán cada vez más escasos y los eventos extremos hidrometeorológicos serán más intensos y frecuentes, no solo en relación a las inundaciones sino también a las sequías [1].

Por otro lado, las investigaciones relacionadas a los recursos hídricos en países desarrollados poco a poco están cambiando de enfoque, pasando a estudiar más medidas de gestión que la implantación de nuevas estructuras de almacenamiento. La Sociedad Española de Grandes Presas (SPANCOLD) detalla que las instituciones de cooperación económica que tienen como clientes a países más desarrollados se aproximan a la implantación de los ODS enfocándose en la gestión de la demanda y haciendo más eficientes los sistemas [2].

En este contexto, distintos enfoques en la gestión de recursos hídricos empiezan a tomar preponderancia de cara a la optimización del recurso, para hacer una lucha frontal al cambio climático y sus efectos adversos. Uno de los enfoques dentro de la gestión integrada de recursos hídricos, es la gestión de uso conjunto, que incorpora usos no convencionales para optimizar el recurso tales como la reutilización y la desalinización. Este enfoque ha ido tomando cada vez más importancia en España en los últimos años, de manera que ha sido reflejado en la memoria del Esquema de Temas Importantes (ETI) del Tercer Ciclo de Planificación Hidrología 2022-2027 de España [3].

España se configura como uno de los países más afectado a nivel mundial en cuanto al impacto del cambio climático en el recurso hídrico, y en particular la zona costera de la vertiente mediterránea. En esta región se encuentra el Sistema de Explotación Mijares-Plana de Castellón, una región del territorio que desde hace décadas ha presentado problemas de sobreexplotación de aguas subterráneas, empobreciendo la calidad de aguas subterráneas del acuífero de la Plana de Castellón (relacionado a la cuenca del río Mijares y al Interfluvio Mijares-Palancia) y del acuífero Medio Palancia (relacionado al interfluvio Mijares-Palancia).[4], los cuales abastecen a más del 50 % de unidades de demanda agraria (UDA) y urbanas (UDU) de la zona de análisis.

Actualmente se cuentan con distintos estudios que demuestran el mal estado en términos de cantidad y calidad de la masa de agua subterránea La Plana de Castellón, registrando importantes niveles de abatimiento freático principalmente en la zona de La Vall d'Uixó (Interfluvio Palancia-Mijares) en donde se registran niveles cercanos a los -50 msnm. Esto ha ocasionado también niveles de intrusión salina elevado en la zona litoral del interfluvio (Moncofa), problemas que a través de los años no se han podido solucionar hasta la actualidad.

Esta investigación estudia la posibilidad de mejorar los niveles piezométricos del acuífero La Plana de Castellón y una mejora en la calidad del recurso a través del análisis de la derivación de los recursos hídricos excedentarios del sistema Mijares hacia el sistema de La Vall d'Uixó, trasegándolos por el canal Cota 100, sin vulnerar considerablemente las garantías de la Unidad de Demanda Agraria Riegos Tradicionales, que se encuentra aguas abajo del punto de toma.

Para realizar esto de la manera más realista posible, se exploran distintos escenarios en el que se modifican el régimen de caudales ecológicos, nuevas características de almacenamiento, curvas de operación de caudales excedentarios y nuevos usos, que nos permitan tener un panorama variado del impacto real de esta alternativa en distintas situaciones.

1.1. OBJETIVOS

- Realizar un análisis de la situación actual del balance de agua en el sistema de explotación Mijares – Plana de Castellón.
- Desarrollo de un modelo de gestión optimizada del sistema, considerando componentes superficial y subterráneo.
- Optimización de una regla de operación para definir los excedentes aprovechables por el interfluvio Palancia-Mijares.
- Realizar un planteamiento de propuestas y escenarios, así como un análisis de aplicabilidad frente a la nueva normativa vigente y forzantes medioambientales.

2. CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN MIJARES – PLANA DE CASTELLÓN

El sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón (Figura 1) comprende la totalidad de las cuencas de los ríos Mijares, Seco, Veo y Belcaire y la totalidad de las subcuencas litorales comprendidas entre Benicasim, incluido su término municipal, y el límite provincial entre Castellón y Valencia [5].

El sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón (Figura 1) se encuentra ubicado en dos comunidades autónomas: Aragón (por el oeste) y la Comunidad Valenciana (por el Oeste). A escala provincial, de la misma manera la región aragonesa pertenece a la provincia de Teruel y la región valenciana pertenece a la provincia de Castellón de la Plana. Hidrográficamente comprende la cuenca del río Seco, la cuenca del Río Mijares (y sus afluentes Villa Hermosa y Rambla la Viuda),

El río Mijares nace en la Sierra de Gúdar en el Municipio de El Castellar en la provincia de Teruel a unos 1600 m de altitud y desemboca entre las localidades de Almazora y Burriana en la provincia de Castellón. La superficie total comprendida por este sistema de explotación es de 4.818 km².



Figura 1. Sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón respecto al resto de sistemas de explotación considerados en la CHJ. Elaboración propia



Entre sus características más relevantes se pueden mencionar las siguientes:

- Las principales infraestructuras de regulación superficial del sistema son los embalses de Arenós, Sichar y María Cristina.
- El sistema presenta 43 masas de agua superficial con una longitud de unos 694 km.
- Existen 14 masas de agua subterránea integradas total o parcialmente en el sistema de explotación.
- En el sistema se han definido 13 unidades de demanda urbana y 18 unidades de demanda agrícola.
- El sistema alberga alrededor del 9% de la población total de la CHJ.

2.1. COMPONENTES DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN

A continuación, se describen los principales elementos del sistema y sus características más importantes.

2.1.1. Infraestructuras

2.1.1.1. Embalses

Las principales infraestructuras de regulación superficial del sistema son los embalses de Arenós, Sichar y María Cristina. Se cuenta además con los embalses de Alcora, Ribesalbes, Vallat, Cirat y Onda cuya función es la de derivar agua para los aprovechamientos hidroeléctricos correspondientes y no de regulación, por lo tanto, no serán tenidos en cuenta en la simulación del sistema (Figura 2, Figura 3 y Tabla 1).

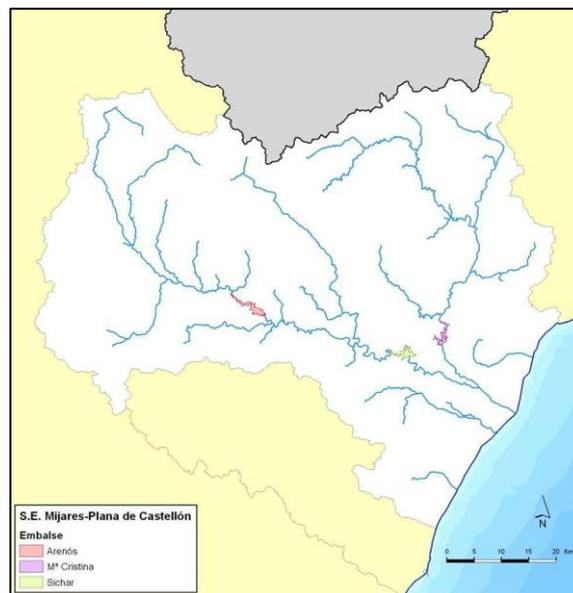


Figura 2. Principales embalses del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21.

Los embalses de María Cristina y Sichar están construidos en calizas karstificadas y tienen filtraciones de importancia (del orden de 45 hm³ anuales) que recargan al acuífero de La Plana de Castellón. Además, este acuífero es recargado por el río Mijares con una cantidad similar a la mencionada, ya que este río se encuentra colgado sobre el acuífero a una distancia aproximada de 20-40 m.

Embalse	Usos	Tipo de presa	Río	Capacidad máxima (hm ³)
Arenós	Riego	Materiales sueltos	Mijares	65,0
Sichar	Riegos y producción de energía	Gravedad	Mijares	45,0
M ^{ra} Cristina	Laminación de avenidas y regadío	Gravedad	Rambla de La Viuda	18,5

Tabla 1. Características de los embalses principales.

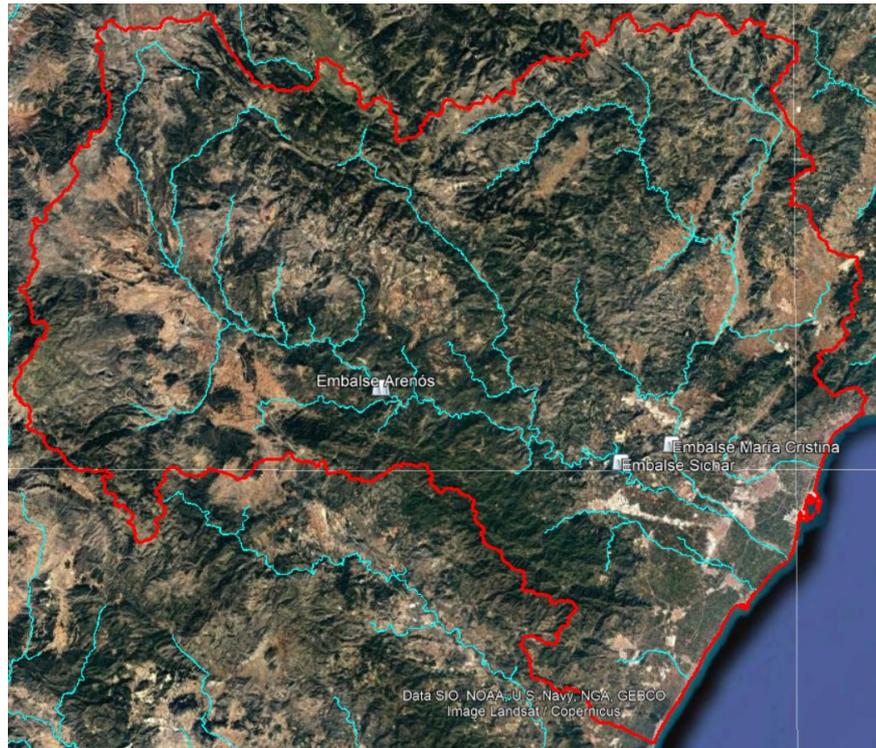


Figura 3: Estructuras de regulación en del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón.

2.1.1.2. Conducciones de transporte

Las principales conducciones de transporte del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón conducen los recursos hídricos desde el punto de captación hasta su área de uso. En el tramo bajo se destacan las acequias asociadas a los riegos tradicionales (los más antiguos de abastecimiento principalmente superficial) como se pueden visualizar en la Figura 4, mientras que aguas arriba (sin dejar de estar en el tramo bajo del sistema de explotación) se encuentran los canales asociados a los riegos mixtos (de abastecimiento superficial y subterráneo) los cuales corresponden a los canales Canal Cota 100, Canal cota 220 y el Canal del Pantano de María Cristina.

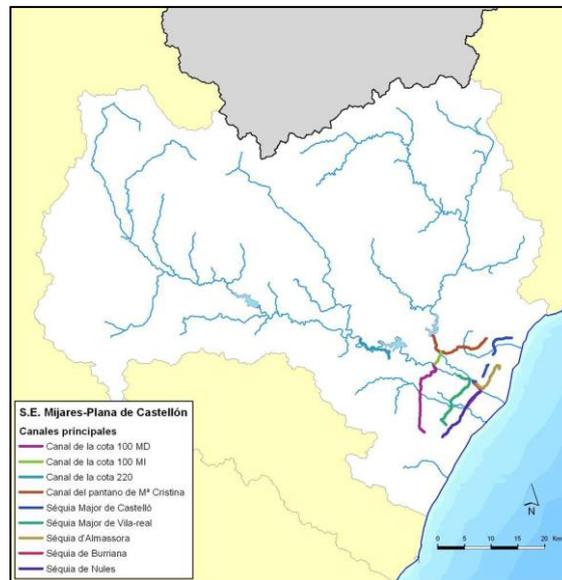


Figura 4. Conducciones de transporte principales del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21.

Asimismo, se puede apreciar en la Figura 5 que la mayor cantidad de canales y acequias se encuentra en la zona litoral del sistema de explotación, configurando un total de 525 kilómetros de líneas de conducción.

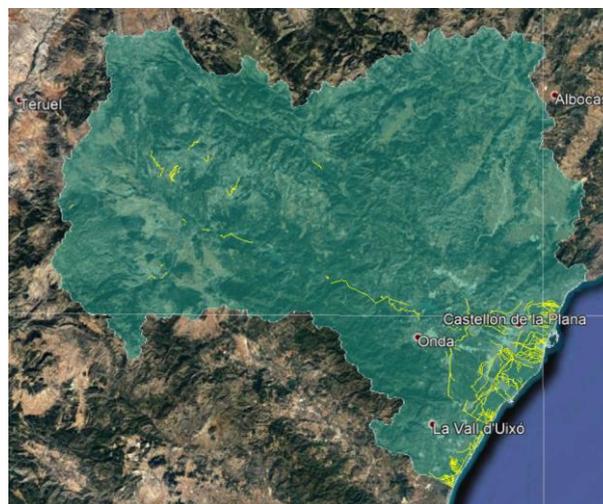


Figura 5. Canales, acequias y sequias del sistema de explotación [en amarillo]. Fuente: CHJ

El conocimiento de la totalidad de estas líneas de conducción es importante para poder identificar desde qué tramo de un río una Unidad de Demanda Agraria (U.D.A.) está derivado caudal para abastecer su demanda, de manera que podamos realizar la modelación de manera más certera.



2.1.2. Recursos hídricos

2.1.2.1. Recursos hídricos totales

Para la evaluación de la aportación total en el sistema se han utilizado los resultados calculados con el modelo PATRICAL del PHJ 15-21, en la tabla siguiente se muestra tanto para el periodo completo 1940/41-2011/12 como para la serie reciente 1980/81-2011/12 el valor medio, máximo y mínimo de la aportación acumulada a la red fluvial en régimen natural.

Sistema de explotación	1940/41 – 2011/12			1980/81 - 2011/12		
	Media aritmética	Máximo	Mínimo	Media aritmética	Máximo	Mínimo
Mijares-Plana de Castellón	327,3	1.057,0	101,5	326,1	1.057,0	101,5

Tabla 2. Aportación acumulada a la red fluvial ($hm^3/año$) en régimen natural según modelo PATRICAL en el sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21.

2.1.2.2. Recursos hídricos subterráneos

Existen 14 masas de agua subterránea integradas total o parcialmente en el sistema de explotación. Dentro de las más importantes tenemos las que se observan en la Tabla 3, donde se indica el recurso renovable, las restricciones ambientales y el recurso disponible del sistema de explotación para el escenario actual obtenidos a partir de los valores de la serie 1980/11. Los valores indicados en la tabla mencionada corresponden a la masa de agua subterránea completa, sin tener en cuenta si la misma se encuentra compartida con otro sistema de explotación.

Los retornos de los riegos (que son mayores en riegos tradicionales) junto con las aguas superficiales que llegan a la zona costera, permiten recargar a los acuíferos y elevar sus niveles, lo que permite protegerlos de intrusión salina.

Cabe finalmente indicar que los valores siguientes corresponden a la masa de agua subterránea completa sin considerar si se encuentra o no compartida con otros sistemas de explotación.

En este sistema los recursos subterráneos juegan un papel muy importante ya que no solo abastecen a las demandas agrarias, lo que es lo más usual, sino también a las demandas urbanas del sistema de explotación. Simulaciones realizadas por expertos en uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas [6], pudieron demostrar que las diferencias en el almacenamiento del acuífero costero supera los 600 $hm^3/año$, cantidad que es más de tres veces el almacenamiento de los embalses (Figura 6). En esta última figura se observa la variación del volumen del acuífero de la Plana de Castellón para tres alternativas de operación, siendo la más baja (hip. 11) de las tres la que representa la estrategia empleada por los usuarios en la actualidad. Las alternativas 12 y 22 suponen una ampliación por la margen derecha del río Mijares del Canal Cota 100.

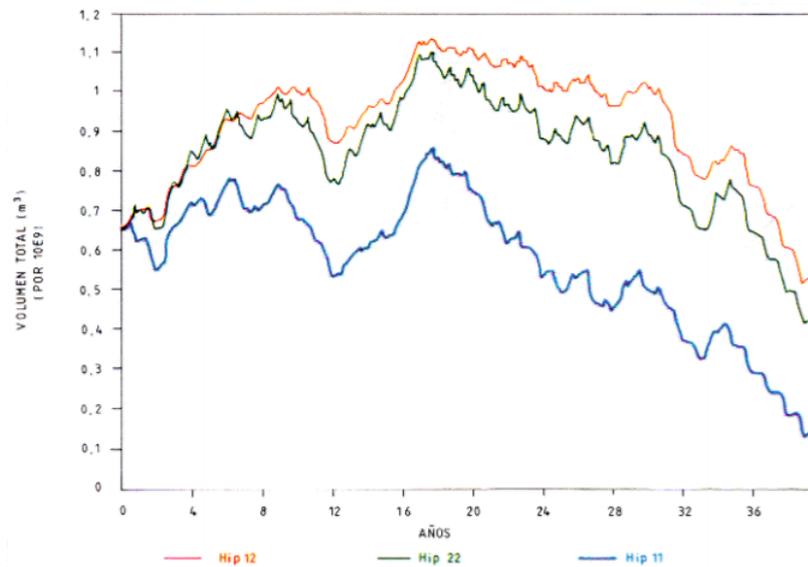


Figura 6: Volumen del acuífero de la Plana de Castellón por encima del nivel mar para tres alternativas de operación del sistema.[6]

Masa de agua subterránea		Recurso renovable zonal	Total restricciones	Recurso disponible
080.103	Javalambre Oriental	75,1	18,9	56,2
080.104	Mosqueruela	46,8	17,8	29,0
080.108	Maestrazgo Occidental	79,4	0,0	79,4
080.111	Lucena - Alcora	75,4	20,4	55,0
080.126	Onda - Espadán	47,0	14,6	32,4
080.127	Plana de Castellón	150,8	46,0	104,8
Total		475,5	117,7	356,8

Tabla 3. Recurso renovable zonal, restricciones ambientales y recurso disponible ($hm^3/año$) de las principales masas de agua subterráneas del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21.

2.1.3. Relaciones río-acuífero

En la Figura 7 se muestra la relación río-acuífero en el sistema de explotación Mijares- Plana de Castellón. Se aprecian dos zonas diferenciadas: los tramos perdedores, que se concentran en los cursos bajos y en la rambla de la Viuda, presentando una conexión difusa indirecta por efecto ducha, y los ganadores que se reparten por el resto del sistema, y se encuentran conectados con el acuífero. En la figura que se hace referencia queda muy bien evidenciado la gran dependencia del sistema de explotación de los recursos subterráneos, donde en la cuenca baja los cursos de agua superficiales quedan desconectados de los acuíferos.

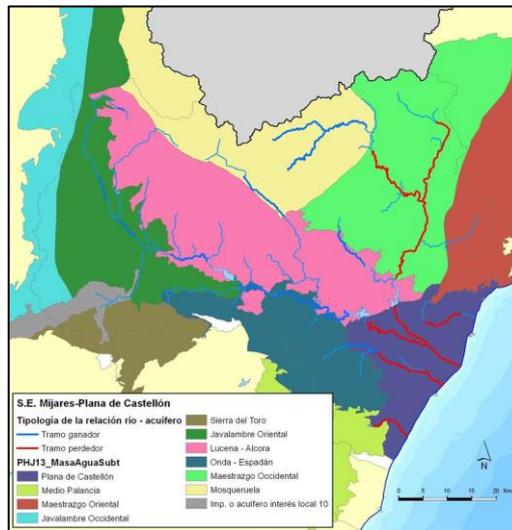


Figura 7. Tipología de la relación río-acuífero en el sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21.

2.1.4. Caudales ecológicos

El PHJ 09/15 estableció cinco puntos de caudal mínimo en el sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón (4 en el río Mijares y 1 en el río Villahermosa) pero para el PHJ 15/21 se ha establecido un régimen ecológico de caudales para todas las masas de agua superficial de categoría río, donde de las 44 masas de agua superficial del sistema se ha fijado caudal ecológico en 27: el eje principal del río Mijares, el río Villahermosa, el tramo medio de la rambla de la Viuda y el río Veo, si bien en algunas cabeceras el caudal establecido resulta inapreciable. En el resto de las masas de agua no se ha fijado ningún caudal ecológico bien porque se trata de embalses o bien porque son masas de agua clasificadas como sin agua en los muestreos, situándose éstas en la cabecera de la rambla de la Viuda, en la desembocadura del río Seco, en el río Belcaire y en algunas pequeñas masas de agua afluentes del río Mijares entre los embalses de Arenós y Sichar (Figura 8).

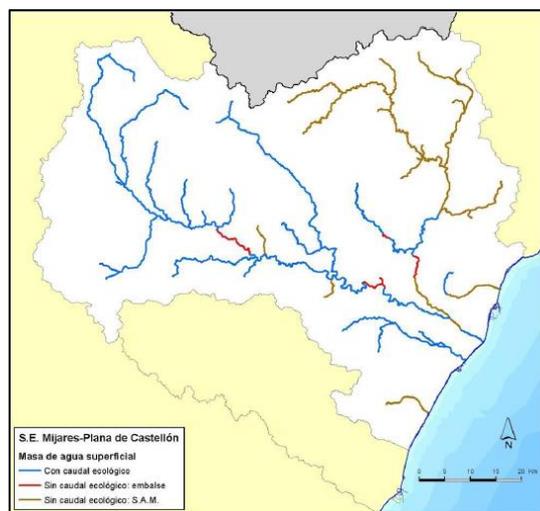


Figura 8. Localización de las masas de agua con caudales ecológicos en el sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón en el PHJ15/21. Fuente: PHJ 15/21.



2.1.5. Usos y demandas

A continuación, se muestra las demandas actuales y en futuros horizontes temporales estimadas de acuerdo con los criterios de la IPH. En el PHJ15/21 se consideraron distintos escenarios como se muestra a continuación.

Escenario 1: Situación inicial. Representa al balance de la situación existente al elaborar el plan, que es de utilidad para realizar comparaciones o estimar variaciones en balances y garantías para el resto de los escenarios.

Escenario 2: Escenario de asignaciones y reservas. Se realizaron para este escenario simulaciones para analizar las garantías y suministros de las principales demandas del sistema de explotación en el escenario 2015 que serán de utilidad para establecer las asignaciones y reservas del plan hidrológico 2015-2021.

Escenario 3: Escenario futuro a medio plazo. En este escenario se analizó la situación del sistema de explotación para el año 2027, teniendo en cuenta las nuevas medidas previstas a realizar y la influencia de estas en las demandas y en los balances del sistema.

Escenario 4: Escenario futuro a largo plazo. El objetivo en este escenario es evaluar las tendencias a largo plazo, para el año 2027 teniendo en cuenta el posible efecto del cambio climático sobre los recursos hídricos del sistema de explotación.

2.1.5.1. Unidades de demanda urbana

Como se ha indicado, en el sistema Mijares-Plana de Castellón se ha identificado 13 UDU cuya distribución se muestra en la Figura 9. Entre ellas destacan las siguientes:

- Subterráneo de Almazora.
- Subterráneo de Castellón de la Plana.
- Subterráneos de Plana de Castellón.
- Consorcio de Aguas de la Plana.

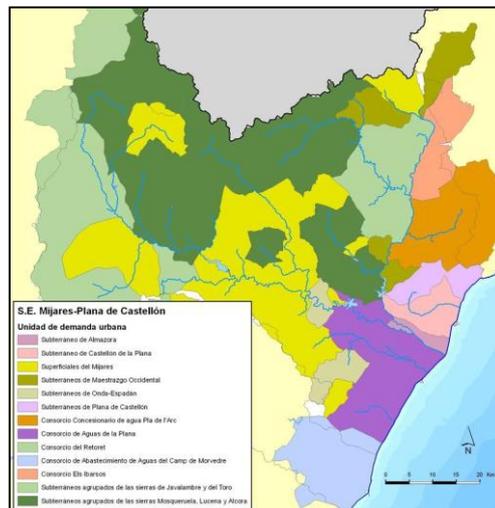


Figura 9. UDU del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21.

En la Tabla 4 puede verse la demanda estimada de las principales UDU del sistema y su evolución para cada uno de los escenarios contemplados en el análisis, debiéndose hacer notar que, a efectos de estimación de la demanda, los escenarios 1 y 2 representan el mismo escenario temporal.

UDU		Escenario 1-2	Escenario 3	Escenario 4
212009	Subterráneo de Almazora/Almassora	2,7	3,1	3,3
212040	Subterráneo de Castellón de la Plana/Castelló de la Plana	19,0	15,4	14,4
400127	Subterráneos de Plana de Castellón	4,9	4,9	5,0
500004	Consortio de Aguas de la Plana	15,9	13,6	13,1
Total principales UDU		42,5	37,0	35,8

Tabla 4: Demanda (hm^3) de las principales UDU del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21.

Es importante resaltar que, en todo el sistema de explotación, solo 4 UDUs se abastecen de la masa de agua subterránea 080.127 Plana de Castellón o 080.130 Medio Palancia, que son principalmente las que destacan puesto que son los acuíferos de interés para la investigación. Además de esto son también las que tienen una mayor demanda. Para fines de la modelación se han elegido las tres con mayor demanda anual correspondientes a Subterráneo Castellón de la Plana con $18.97 \text{ hm}^3/\text{año}$, Consortio de Aguas de la Plana con $15.92 \text{ hm}^3/\text{año}$ y Subterráneos de Plana de Castellón con $4.91 \text{ hm}^3/\text{año}$.

2.1.5.2. Unidades de demanda agrícola

En el sistema Mijares-Plana de Castellón se han definido 18 unidades de demanda agrícola (Figura 10) de ellas 3 son superficiales, 6 subterráneas y 9 mixtas.

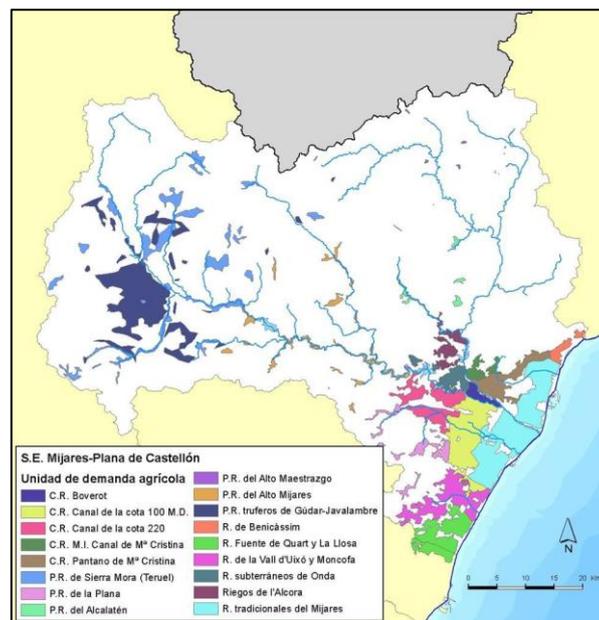


Figura 10. UDA del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21.



La Tabla 5 incluye el volumen de demanda previsto en cada escenario para las principales UDA definidas en el sistema de explotación teniendo en cuenta que algunas de estas demandas se encuentran compartidas con otros sistemas de explotación y que los valores recogidos en esta tabla corresponden a la totalidad de las unidades de demanda consideradas. La variación de volumen entre escenarios se debe, en general, al efecto de las actuaciones de modernización de regadíos que están desarrollando (o tienen previsto desarrollar) las distintas administraciones públicas.

UDA		Escenario 1-2	Escenario 3-4
082015A	CR Canal de la cota 220	19,4	19,4
082015B	C.R. Canal de M ³ Cristina	14,0	14,0
082015C	C.R. Canal de la cota 100 MD	39,0	39,0
082017A	Riegos tradicionales del Mijares	63,6	63,6
082019A	Regadíos de la Vall d'Uixó	12,6	12,6
082019B	Regadíos Subterráneos de Moncofa	8,2	8,2
082020A	Regadíos de Fuente de Quart y Fuente La Llosa	28,4	27,6
Total principales UDA		185,2	184,4

Tabla 5. Demandas (hm³) de las principales UDA del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21.

En la tabla siguiente se muestra la evolución, en los diferentes escenarios, de la demanda agraria total del sistema, que incluye, únicamente, las demandas producidas dentro del sistema de explotación.

Demanda	Escenario 1-2	Escenario 3-4
Agrícola	216,6	216,0
Ganadera	1,8	1,8
Total agraria	218,5	217,9

Tabla 6. Demanda agraria total (hm³) del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21.

2.1.5.3. Unidades de demanda industrial y recreativa

En el sistema Mijares-Plana de Castellón, se han identificado 2 unidades de demanda industrial. En la Tabla 7 siguiente se puede observar la demanda industrial de estas UDI en cada uno de los escenarios considerados. De igual manera se calculó la demanda recreativa (Tabla 8) y que, debido a su escaso volumen, se presenta de forma agregada para todo el sistema de explotación.

UDI		Escenario 1-2	Escenario 3	Escenario 4
200001	Subterráneos de la Plana de Castellón	19,7	24,4	26,5
200002	Resto de subterráneos de Mijares-Plana de Castellón	2,8	3,5	3,8
Total principales UDI		22,5	27,9	30,3

Tabla 7. Demandas (hm³) de las principales UDI del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21.



Demanda	Escenario 1-2	Escenario 3-4
Recreativa	1,2	1,6

Tabla 8. Demanda (hm^3) recreativa del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21.

2.2. PROBLEMAS DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN

Luego de una revisión bibliográfica para identificar adecuadamente problemas [7] y de noticias de diarios locales, hemos detectado que el sistema de explotación cuenta con problemas que podrían ser optimizados una vez identificados y estudiados en detalle. De esta manera se podrían proponer soluciones a los mismos y gestionar los fondos para llevar a cabo las inversiones en caso de que impliquen incorporar nueva infraestructura o en caso contrario realizar los cambios de gestión necesarios para revertir la problemática. Para poder lograr un orden de prioridad hemos decidido dividir los problemas en dos grupos: principales y secundarios como se muestra a continuación:

2.2.1. Problemas principales

- Sobreexplotación de los acuíferos Medio Palancia y Plana de Castellón, ambas en mal estado cuantitativo.
- Problemas de deslizamientos en Embalse Arenós que limitan su volumen útil a 65 hm^3 , cuando fue diseñado para 136.9 hm^3 .
- Intrusión marina en los acuíferos costeros del sistema de explotación, principalmente en los acuíferos que se encuentran en los extremos norte y sur de la cuenca en estudio. La razón por la cual el fenómeno de intrusión marina se agudiza en estos puntos, es debido a que los retornos de riego son menores al resto de la cuenca, lo que permite a la cuña marina avanzar sobre las masas subterráneas salinizándolas.
- Pérdidas en redes de regadío por falta de modernización, que reducen la eficiencia en el uso de agua. Si bien en los últimos años se ha avanzado mucho en la modernización de regadíos, debido principalmente a los subsidios y distintos planes de financiación que ha brindado el Gobierno Español, todavía es posible aumentar las eficiencias de conducción, distribución y aplicación.
- La modernización de los regadíos tradicionales en la zona costera, implementando riegos localizados más eficientes, tiene *contrapartidas* debido a que se disminuye la recarga de los acuíferos y aumenta la extracción por bombeos. Esto podría traducirse como una disminución en la barrera creada por la infiltración de los retornos de riego tradicionales y en un aumento en la probabilidad de intrusión salina en los acuíferos costeros.
- Problemática de contaminación de las aguas subterráneas con nitratos producido debido al uso intensivo de fertilizantes en una cuenca en donde el abastecimiento urbano se hace exclusivamente con aguas de acuífero.

2.2.2. Problemas secundarios

- Caudales ecológicos poco restrictivos: En Octubre del 2019 se ha registrado una disminución importante del caudal ecológico en la desembocadura del río Mijares, al punto de prácticamente tener un cauce seco, desde el azud de Almassora hasta la desembocadura en el mediterráneo. Esto ha provocado la muerte de muchos peces que quedaban en las numerosas balsas en todo este tramo de aproximadamente 14 kilómetros.[8]



Figura 11. Desembocadura del río Mijares sin caudal ecológico. Fuente: www.cope.es

- Mal estado ecológico de algunos cursos de agua: Un estudio realizado por el ingeniero técnico forestal y presidente de la asociación ecologista Mijares Vivo, José Manuel González, sobre el estado ecológico de la cuenca del Mijares en la provincia de Teruel revela que está en peor situación que antes de la instalación de las depuradoras de aguas residuales. El mismo realizó un estudio demostrando que se acumulan más fangos orgánicos que en 2001 y que hay una menor población de peces y que éstos son de talla más pequeña.
- Funcionamiento deficientemente de algunas depuradoras, caso de la de Cedrillas, Manzanera y Venta del Aire.
- Municipios que no tratan sus aguas residuales antes de verterlas a los cursos de agua del sistema: En la Comarca de Gúdar-Javalambre se encuentran Linares de Mora, Valbona, Cabra de Mora, Nogueruelas y Torrijas.

2.3. DESCRIPCIÓN TOPOLÓGICA DEL SISTEMA DE EXPLOTACIÓN

Para poder estudiar el comportamiento del sistema de explotación Mijares - Plana de Castellón es necesario, debido a su complejidad, realizar ciertas simplificaciones. Como puede observarse en el esquema simplificado de la Figura 12 para la modelación del sistema se han tenido en cuenta todos los elementos que tienen un papel importante en la gestión de los recursos de la cuenca como son los principales embalses de regulación (Arenós, Sicha y María Cristina). Además del río Mijares y sus afluentes principales (Villahermosa y Rambla de la Viuda) se ha considerado el río Belcaire, un pequeño río incluido en el sistema de explotación del que se extraen recursos para la recarga de los acuíferos.

El esquema también incluye las masas de agua subterráneas Plana de Castellón y Medio Palancia (Figura 13). En el primer caso, la masa de agua Plana de Castellón suministra agua a los riegos mixtos y a los municipios de la zona, permitiendo además representar las infiltraciones del río Mijares. En el caso de Medio Palancia, su inclusión es necesaria para representar de forma adecuada el proceso de recarga desde la Balsa de Belcaire. La inclusión de ambas masas de agua permite la consideración del suministro con recursos subterráneos al abastecimiento urbano y los riegos mixtos.

Las demandas urbanas se han representado en las Unidades de Demanda Urbana Consorcio de la Plana, Subterráneos de Almazora, Subterráneos de Castellón de la Plana y Subterráneos de Plana de Castellón. De igual modo, están representadas las principales zonas de regadío como son los Riegos Tradicionales del Mijares, los Riegos Canal de María Cristina, los Riegos Canal Cota 100 y los Riegos Canal Cota 220. Se han incluido en el modelo los regadíos de la Vall d'Uixó - Moncofa, que riegan fundamentalmente con

aguas subterráneas del interfluvio Mijares-Palancia (Figura 14). A efectos de su representación en el modelo, se ha utilizado un elemento tipo Acuífero - Autovalores denominado Plana 1(Costa) que corresponde principalmente a la masa de agua subterránea Plana de Castellón que se ocupa principalmente del abastecimiento de los riegos mixtos. Sin embargo, las demandas asociadas a la masa de agua subterránea de Medio Palancia, vinculadas a los riegos de la zona de La Vall d'Uixó, también han sido consideradas especificando un impacto de dichas demandas en la zona sur del elemento Plana1(Costa).

Un dato de interés es que la modelación del impacto de distintas demandas asociadas a dos masas de agua subterránea distintas en un solo elemento acuífero ha sido posible gracias al empleo del módulo AQUIVAL que nos permite una modelación distribuida del acuífero, en el que podemos especificar el impacto de distintas demandas en distintas zonas del acuífero.

En este sistema juegan un papel destacado los retornos urbanos reutilizados en las zonas de riego del Canal de María Cristina y en los regadíos de la Vall d'Uixó – Moncofa. Es por ello por lo que se ha incluido la reutilización directa de los efluentes de las EDAR de Castellón, Vall d'Uixó y Moncofa.

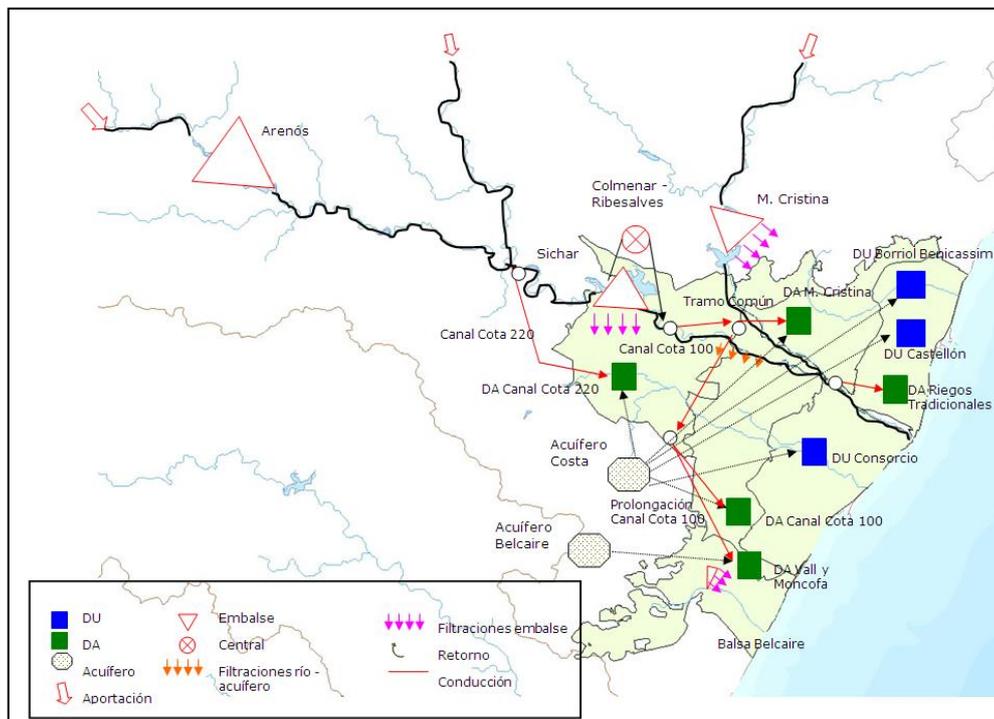


Figura 12. Topología del Sistema de Explotación Mijares- Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15/21.

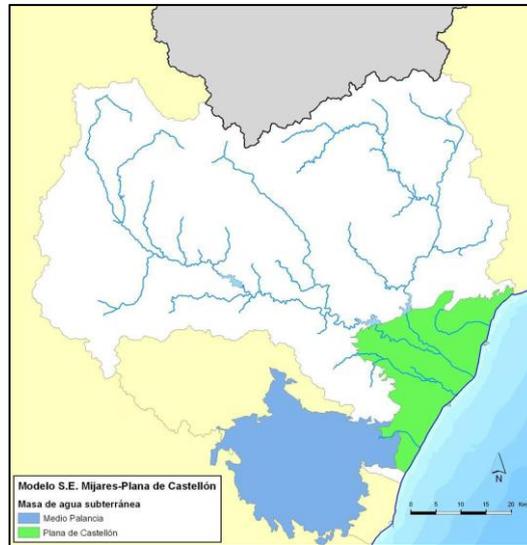


Figura 13. Masas de agua subterránea incluidas en el modelo de simulación del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón.

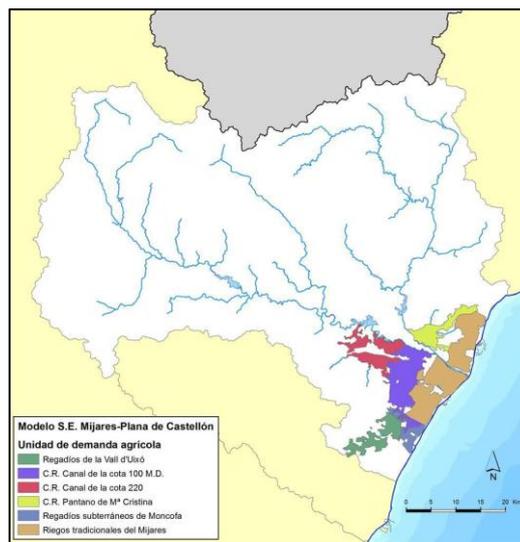


Figura 14. UDA consideradas en el modelo de simulación del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón.
Fuente: PHJ 15/21.

Las conducciones de transporte consideradas en el modelo son las siguientes:

- El canal de la cota 220, ubicado aguas arriba del embalse de Sichar y destinado al riego de la UDA Canal Cota 220.
- El tramo común, ubicado aguas abajo del retorno de la central hidroeléctrica de Colmenar y que se emplea para evitar el primer tramo de filtraciones del río Mijares.
- El canal de la cota 100, que parte del tramo común para el riego de la UDA Canal Cota 100.
- El canal de María Cristina, que parte también del tramo común para el riego de la UDA Pantano de María Cristina.
- Red de conducciones y acequias de los riegos tradicionales.

Con respecto a las aportaciones el modelo del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón cuenta con unos recursos superficiales que ascienden a 228 hm³/año en el periodo completo 1940/41- 2011/12 y a 225,7 hm³/año para la serie reciente. Como se podrá observar en la serie completa de la Figura 15, se presenta cierta continuidad en el volumen del recurso superficial, descartando "el efecto 80" que se evidencia en otras cuencas en España.

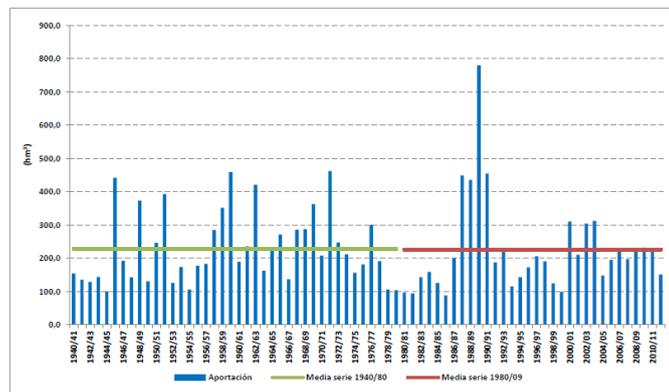


Figura 15. Aportación anual total en el modelo de simulación del sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón.
Fuente: PHJ 15/21

3. METODOLOGÍA

Establecido el objetivo de la investigación y habiendo descrito adecuadamente las características del sistema, se puede conceptualizar una metodología que permita abordar todas las aristas que conlleven a el logro de los objetivos propuestos, la cual se relata a continuación:

En primer lugar, se realiza la recolección y análisis de información existente en donde se lleva a cabo una recolección de todo tipo de informes (sean tesis, tesinas, artículos científicos, series, documentos técnicos, entre otros) relacionados al área y temática de estudio. Luego de esto, se recaban datos relacionados a archivos digitales con los que se pueda observar la información en sistemas de información geográfica, así como modelos realizados previamente.

El conocimiento espacial del área de estudio, distribución de UDAs, UDUs, geolocalización de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTARs), Instalaciones de Desalación de Aguas Marinas (IDAMs), etc. suele ser subestimado, pero tiene una relevancia neurálgica en estudio de tipo balance hídrico de manera que puedan utilizarse por ejemplo fuentes no convencionales y considerarse las fuentes con mayor cercanía a determinadas zonas de demanda.

En segundo lugar, se realiza la elección de modelo de simulación y su implementación; con toda la información recopilada y analizada, se procede a realizar un análisis del modelo de simulación más adecuado para poder llevar a cabo el balance hídrico del sistema de explotación, tomando en cuenta las características más importantes que han de tener los modelos para que sean de utilidad en el estudio, así como procurando cumplir con el principio de parsimonia de manera que nos permita ajustar el escenario real de la manera más simple y eficiente posible. En esta investigación se consideran los modelos WEAP, HYDRO-BID, SWAM, AQUARIUS, WRAP TEXAS y AQUATOOL.

En tercer lugar, se analizará la obtención de información secundaria acorde al modelo elegido puesto que, una vez elegido el modelo de simulación, se analizan los paquetes más importantes que han de tomarse en cuenta para llevar a cabo el modelo y se realiza una lista de comprobación de las variables mínimas necesarias que se han de tener del área de estudio para ajustar el escenario real al modelo seleccionado.



Estas variables se procuran conseguir principalmente de fuentes externas, en muchos casos las variables serán pertenecientes a estudios ya realizados en la zona por la confederación o por autores en estudios similares, de manera que se cuente con datos más fiables y previamente calibrados.

En cuarto lugar, se procede con la modelación y la calibración de resultados; una vez que cuenten con todos los datos necesarios, se procede al montaje del modelo el cual está directamente influenciado por la caracterización topológica que se ha decidido, adoptado y/o mejorado.

Lógicamente, se realiza primero una descripción de la topología adoptada, se ingresan los datos previamente conseguidos en el modelo y, una vez establecidos los parámetros de calibración, se busca la simulación y calibración del modelo desarrollado.

En este tipo de investigaciones, el modelo calibrado con un escenario actual o pasado es uno de los momentos más importante del estudio pues a partir de él se puede lograr caracterizar elementos topológicos como acuíferos o ríos a través de coeficientes característicos y además porque a partir de este se pueden generar escenarios sintéticos de análisis.

Finalmente, se generan distintos escenarios y se analizan los resultados puesto que con el modelo calibrado ya se puede realizar un estudio de escenarios de simulación que permita estudiar la disponibilidad hídrica de los excedentes del río Mijares para poder abastecer la zona del interfluvio Palancia – Mijares de manera que puedan reducirse los bombeos de aguas subterráneas y así asegurar la sostenibilidad del acuífero, retroceso de cuña salina y preservar el buen estado de la masa de agua subterránea.

4. RECOLECCIÓN Y ANÁLISIS DE ESTUDIOS ANTECEDENTES

4.1. INSTRUCCIÓN DE PLANIFICACIÓN HIDROLÓGICA (IPH-2008)

La instrucción de planificación hidrológica del 2008 indica que el buen estado cuantitativo de las aguas subterráneas se da cuando la tasa media anual de extracción a largo plazo no rebasa los recursos disponibles de agua y no está sujeta a alteraciones antropogénicas.

Asimismo, indica que el buen estado ecológico de un acuífero se logra cuando los indicadores de calidad biológicos muestran valores bajos de distorsión causada por la actividad humana. Además, las concentraciones de contaminantes no superan las normas establecidas. El buen estado químico de las aguas subterráneas también cobra especial importancia y se cumple cuando su composición química no presenta efectos de salinidad u otras intrusiones.

Dado que se analizarán tendencias y escenarios en este trabajo, la definición que IPH-2008 brinda para el escenario tendencial indica que es aquel que se produciría si se mantuviesen las tendencias de los usos de agua y solo se aplicasen las medidas básicas necesarias para aplicar la legislación sobre protección de las aguas.

En cuanto a la optimización del recurso hídrico, define como pérdida aparente de agua en abastecimiento de población a aquella que comprende los consumos autorizados que no se miden ni facturan y los consumos no autorizados y las imprecisiones de los contadores.

Sobre los análisis de cambio climático se indica que es preferible estimar mediante modelos de simulación hidrológica, los recursos que corresponderían a los escenarios climáticos previstos por el Ministerio del Ambiente (ahora de transición ecológica). Eso se realizará según el horizonte temporal establecido y la zonificación de la cuenca, en caso de tenerla. Por otro lado, indica que en tanto en cuanto las evaluaciones correspondientes a estos escenarios no se encuentren disponibles se aplicarán los porcentajes de



reducción global de aportaciones naturales de referencia, donde para el caso del Júcar el porcentaje de disminución es de 9 %.

Sobre las demandas se indica que las demandas pertenecientes a un mismo uso que compartan el origen de suministro y cuyos retornos se reincorporen básicamente a la misma zona o subzona se agruparán en unidades territoriales más amplias, denominadas unidades de demanda. Asimismo, se indican que las demandas futuras se ajustarán teniendo en cuenta las previsiones de evolución de los factores determinantes.

Es importante que estén diferenciadas las demandas que serán atendidas con aguas superficiales, con aguas subterráneas, con aguas regeneradas y con aguas procedentes de la desalación.

En cuanto a la estimación de la demanda agrícola, deben tener en cuenta también la evolución probable de la superficie de regadío y de los tipos de cultivos, los sistemas y la eficiencia del riego.

La eficiencia de cada demanda se obtendrá como producto de las eficiencias de transporte, distribución y aplicación. Esto se extraerá del Censo Agrario del Instituto Nacional de Estadística, a escala comarcal, así como otros tipos de fuentes. En caso estas no se cuenten, se pueden considerar las eficiencias consideradas en la Tabla 9:

Eficiencias	Características	Valor
Eficiencia de conducción	A cielo abierto	0,85-0,90
	A presión	0,90-0,95
Eficiencia de distribución	A cielo abierto	0,85-0,90
	A presión	0,90-0,95
Eficiencia de aplicación	Gravedad	0,60-0,70
	Aspersión	0,70-0,85
	Aspersión mecanizada	0,80-0,90
	Localizado	0,90-0,95

Tabla 9. Valores de eficiencias para regadío de IPH-2008

Las presiones sobre la masa de agua superficial incluirán las fuentes de contaminación puntuales y difusas, así como la extracción de agua, regulación de flujo y las alteraciones morfológicas y otras afecciones significativas de la actividad humana. Asimismo, las presiones sobre la masa de agua subterránea pueden ser originadas por fuentes de contaminación puntual y difusa, extracción de agua y recarga.

Además, indica que cuando se plantea una recarga artificial al acuífero, se deben indicar los recursos disponibles para la recarga artificial y su calidad fisicoquímica y bacteriológica, así como la tasa de recarga. Será importante también tener control de la respuesta del acuífero a la recarga con indicadores del comportamiento hidrogeológico detallando los dispositivos necesarios para efectuarla (balsas, zanjas, actuaciones en cauces) o pozos de inyección, galerías y drenes. Se han de plantear los puntos de recarga artificial y la evolución temporal de los volúmenes de recarga para cada masa de agua subterránea.

En cuanto a los caudales ecológicos, el IPH-2008 indica que se han de desarrollar en tres fases: la primera de ellas es realizar estudios técnicos destinados a determinar los elementos del régimen de caudales ecológicos en todas las masas de agua, sean estas muy modificadas o no. En esta fase se contempla un caudal mínimo menos exigente para episodios de sequía prolongada. La segunda y tercera fase corresponden a la concertación e implantación.

La evaluación de los sistemas de explotación incluye la definición de niveles umbrales de reservas a partir de los cuales se activen ciertas restricciones en el suministro o se movilicen recursos extraordinarios. Se



debe realizar un balance entre los recursos y demandas para cada uno de los sistemas de explotación y si comprende más de una cuenca, se ha de detallar por cuenca.

Un apartado muy interesante es aquel que describe las medidas para la protección del agua en el que describen todas las medidas y sus respectivas normativas asociadas que han de cumplir. También indica que, para fomentar el uso eficiente y sostenible del agua, se analizará cómo la política de precios y estructura tarifaria puede constituir un incentivo para alcanzar un uso más eficiente.

4.2. Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica Del Júcar 2015-2021

4.2.1. Generalidades

Algunos aspectos interesantes que son analizados en el PHJ 2015-2021 en relación con el estado de las masas de agua subterránea (evaluados con el peor valor de su estado cuantitativo-apoyado en la red piezométrica y de su estado químico) - red de calidad.

Asimismo, se siguen los lineamientos propuestos por la Comunidad Europea, versión española: Guía sobre el estado de las aguas subterráneas y la evaluación de las tendencias, los cuales comentan sobre la aplicación de 4 test: Test de balance hídrico, test de flujo de agua superficial, test de ecosistemas terrestres dependientes de las aguas subterráneas y test de intrusión marina. Resalta el hecho que las masas de agua subterránea Plana de Castellón y Medio Palancia se encuentran en mal estado cuantitativo por incumplir el test de balance hídrico mientras que adicionalmente la masa Plana de Castellón también incumple el test de intrusión marina.

4.2.2. Anexo 06: Sistemas de explotación y balances

Realiza una adecuada caracterización donde refiere que existen 14 masas de agua subterránea integradas al sistema de explotación, 13 Unidades de Demanda Urbana (UDU) de los cuales 61 % son de tipo subterráneo, 18 Unidades de Demanda Agraria (DA) sienten los riegos truferos de Gúdar y del Mijares los más importantes con más del 35 % en términos de área regada.

Sobre los caudales ecológicos, como ya se mencionó en otros apartados, existían 5 puntos de control de caudal mínimo (4 en Mijares y 1 en Villahermosa). Hidroregión Mijares – Cenia (20% más de caudales en mayo y junio). Para el PHJ 2015-2021 se han establecido 27 puntos de control de las 44 masas de agua. Sin embargo, aún existen zonas sin agua medida (SAM) principalmente en la Rambla la Viuda y, extrañamente, también en el río Belcaire y aguas arriba de la confluencia entre el río Mijares y la Rambla la viuda.

Las unidades de demanda urbana más importantes corresponden a la de Castellón de la Plana y Consorcio de Aguas de Plana, representando casi el 70 % de todas las demandas urbanas del sistema de explotación. Sucede lo mismo con las 18 unidades de demanda agraria, abastecidas principalmente de agua subterránea se encuentran en el orden de los 185 hm³/año., la Tabla 10 es una de las más importantes, puesto que muestra la demanda urbana para todos los escenarios analizados, observándose que la demanda de los riegos tradicionales del Mijares, el canal cota 100 y los regadíos de fuente de Quart son los más importantes, representando casi el 70% de la demanda total agraria.

	UDA	Escenario 1-2	Escenario 3-4
082015A	CR Canal de la cota 220	19,4	19,4
082015B	C.R. Canal de M ^a Cristina	14,0	14,0
082015C	C.R. Canal de la cota 100 MD	39,0	39,0
082017A	Riegos tradicionales del Mijares	63,6	63,6
082019A	Regadíos de la Vall d'Uixó	12,6	12,6
082019B	Regadíos Subterráneos de Moncofa	8,2	8,2
082020A	Regadíos de Fuente de Quart y Fuente La Llosa	28,4	27,6
Total principales UDA		185,2	184,4

Tabla 10. Unidades de demanda agraria consideradas

Este documento también realiza un análisis del componente superficial del sistema de explotación. A destacar en este apartado se puede encontrar que solo se considera reutilización de la EDAR de la Vall d'Uixó (en el río Belcaire). Aportación de tipo reutilización en el tramo final por las EDARs de Villa real y de Almazora (Cuenca baja del Mijares, en su tramo final) y Onda-Betxi-Vila-Real (entre el río Mijares y el río Veo). Los Escenarios 2, 3 y 4 reutilización de EDAR Castellón de la Plana (entre el río Seco y el Mijares tramo final) para regar pantanos y riego en la Vall d'Uixó y María Cristina. Estas EDARs se pueden visualizar en la Figura 16:

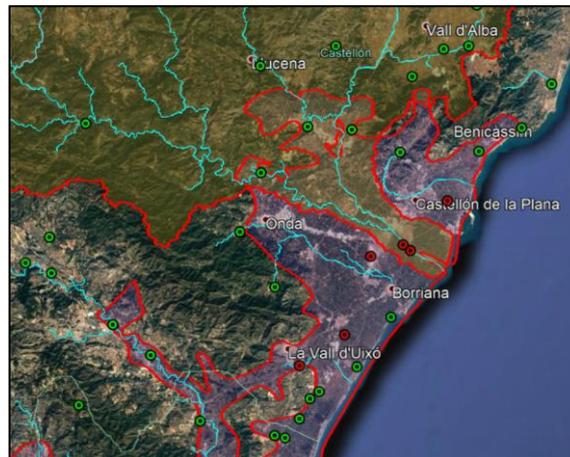


Figura 16. EDARs utilizadas para regeneración de aguas

Un punto interesante para denotar es que debido a que las demandas urbanas son principalmente de tipo subterráneo, son modeladas con un software aparte, a diferencias de las agrarias. Dentro de este análisis se considera que las UDA Pantano María Cristina y UDA la Vall d'Uixó reutilizan EDAR Castellón y de la Vall d'Uixó, respectivamente. La EDAR Nules llega a la Marjalería de Nules, por lo que requiere un seguimiento específico ya que se requiere su modernización, así como un estudio sobre la posibilidad de cambiar la concesión de la EDAR por aguas superficiales del Mijares.

En cuanto a las reglas de gestión consignadas se rigen bajo los siguientes criterios:



- Para el uso de aguas superficiales los riegos tradicionales tienen mayor prioridad que los mixtos, abasteciéndose principalmente de aguas superficiales, mientras que los riegos mixtos se abastecen en gran medida de recursos subterráneos y pozos de sequía.
- Prioriza uso de agua de Arenós.
- “Convenio de bases para la ordenación de las aguas del río Mijares” de 1970.
- “Utilización alternativa”: Aguas superficiales en años húmedos y aguas subterráneas en años secos.
- No se ha considerado desvío de excedentes hacia las ramblas para infiltración.

Análisis del componente superficial y subterránea del sistema de explotación Mijares – Plana de Castellón

De los resultados de la modelación realizado podemos mencionar resumir los análisis realizados en la Tabla 11:

	Componente Superficial	Componente Subterráneo
Escenario 1: Actual	Cumple con criterio IPH de manera muy poco holgada, de donde se destaca el uso de la EDAR de la Vall d’Uixó y explotación de aguas subterráneas en la Vall d’Uixó	Se identifican 3 masas en mal estado cuantitativo: Plana de Castellón, Sagunto y Medio Palancia. Índice igual a 1.
Escenario 2: Asignaciones	Cumple con los criterios y no se consideró a la EDAR Castellón por tener expediente archivado. Cumple con restricciones ecológicas.	Se obtiene un balance total negativo de -2.3 y un índice de explotación igualmente de 1.
Escenario 2: Reservas	Se consideran reserva para sustituir bombeo y además el reúso de EDAR Castellón para riegos tradicionales. Se consideró Balsa Belcaire, la cual no ha entrado en uso actualmente. No se definieron reglas de operación para pozos de sequía para uso conjunto con EDAR Castellón, la cual permite cumplir los criterios de garantía. A la fecha no se sabe si estas obras, sumado al aprovechamiento de excedentes del Mijares, se han puesto en marcha.	Se contempla reducción de extracciones gracias a la desaladora Oropeza, Sagunto y Moncofar (a la fecha esto no se ha logrado). También se contempla reutilización de aguas de EDAR Castellón y derivar excedentes del Mijares al Interfluvio Palancia – Mijares. Se logra un índice de explotación de 0.9.
Escenario 3: Horizonte 2027	IDEM Escenario 2 - Reservas	Considera las mismas medidas que en el escenario 2, más la optimización de los regadíos de Fuente de Quart y Fuente la Llosa. Supone un incremento del bombeo industrial y decremento del urbano, logrando un índice de 0.8.
Escenario 4: Horizonte 2033	Afección de 12 % a la serie histórica de aportaciones. No cumple con los criterios de garantía y sugiere que se aborden con medidas de ahorro y gestión.	Dado que necesita más aguas de la EDAR para suplir regadíos, no habrá un volumen para las recargas. Se obtiene un índice de 1.1, en donde se incrementó los bombeos industriales y se redujeron los urbanos.

Tabla 11. Resumen de análisis de los resultados de los escenarios simulados



4.3. Esquemas de Temas Importantes 2022-2027

Dentro del tercer ciclo de Planificación Hidrológico – enero 2020, se encuentra el tema 12 correspondiente a la Optimización de la oferta de recursos hídricos y gestión de infraestructuras. Ya se prevé la escasez del recurso con los estudios del IPCC y CEDEX, en aproximadamente del 15 a 40 %.

La confederación Hidrográfica del Júcar se encuentra en dependencia baja de desaladoras, aunque actualmente han llegado a ofertar 0.5 euros por metro cubico como ratio en España. En el documento se pone de manifiesto un tema interesante que indica que la gestión y mantenimiento de presas y canales también juegan un rol importante, debido a que la construcción de nuevas estructuras de regulación es muy poco probable.

Aspectos abordados:

- Disponibilidad de agua amenazada por la contaminación

Debido a presiones de ganadería y agricultura. Problemas de nitratos y pesticidas. Contaminación difusa. Así también contaminación por intrusión salina.

- Mejorar la garantía ante los escenarios de reducción de recursos con cambio climático

Considerar desalación y reutilización (en el marco de los principios de economía circular), aunque sea a costa de aumentar el precio medio del agua. En Júcar hay 7 desaladoras a lo largo de toda su costa. Las Instalaciones de Desalación de Aguas Marinas de Oropesa y Moncofa, actualmente generan un volumen bastante menor al que podrían atender realmente. Su capacidad máxima se puede ver en la Tabla 12.

IDAM	Capacidad máxima de producción (hm ³ /año)		
	Actual	I fase completa	II fase
Orpesa	17,8	23,7	47,2
Moncofa	10,9	10,9	21,9
Sagunt	8,4	8,4	16,7
Mutxamel	18,3	18,3	29,2
TOTAL	55,4	61,3	115,0

Tabla 12. Capacidad máxima de generación de EDARs

- Disminución de presiones sobre las aguas subterráneas

En función a reutilización y desalación, en donde se sugiere cambiar la normativa necesaria para la reutilización, integrando los tratamientos necesarios y su coste en el ciclo integral del agua, reconociendo así el principio de quien contamina paga. Los tratamientos terciarios para la regeneración de las aguas de forma que sean aptas para el regadío, el transporte y regulación de las aguas regeneradas hasta el usuario y la disminución de la conductividad en las entradas de las EDAR son importantes cuestiones que también se deben afrontar para garantizar el éxito.

Además de esto, la reutilización agrícola tiene una especial importancia, dado que la recuperación de nutrientes a través de la reutilización puede suponer un importante ahorro tanto en los tratamientos de depuración como en aplicación de fertilizantes por parte del agricultor, aunque también puede ser útil para el riego de partes y jardines. Actualmente de los 450 hm³/año de recursos que se tratan en EDAR de la DHJ, solo se reutiliza anualmente en el orden de los 100 hm³ y que se ha mantenido constante en los últimos años, según se aprecia en la Figura 17.

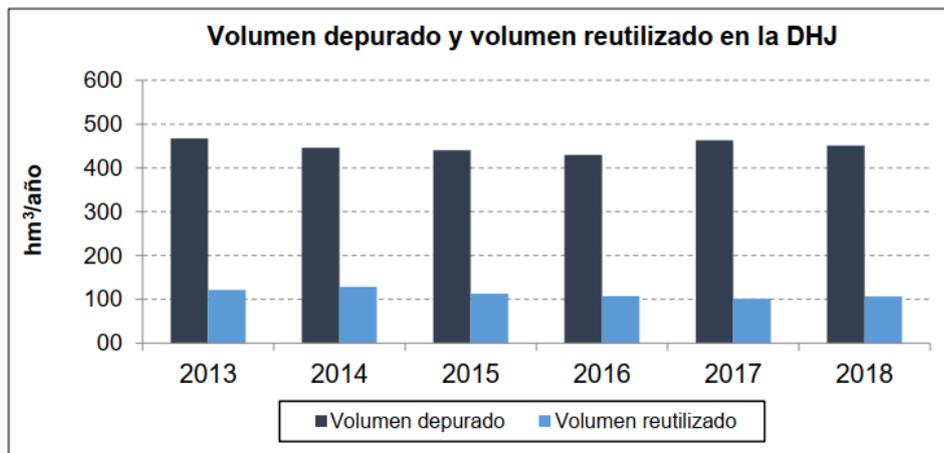


Figura 17. Evolución del volumen depurado y reutilizado de las EDARs

- Gestión de Infraestructuras hidráulicas (presas y canales).

La gestión y el mantenimiento de las infraestructuras es completa ya que debe tener en cuenta aspectos que condicionan su explotación tales como su configuración en la cuenca, la seguridad ante avenidas, la gestión ante escasez de recursos, la antigüedad y los condicionantes ambientales, además de su necesaria adaptación para que cumplan con los parámetros de seguridad que se exige a este tipo de infraestructuras.

Uno de los más grandes problemas es que los volúmenes reutilizados se generan de manera continua por provenir de la población, pero la agricultura es fundamentalmente estacional, por lo que se necesitarían estructuras de almacenamiento, lo que aumentaría el coste del recurso y dificultaría el mantenimiento de la calidad. A veces el problema también puede provenir de la elevada conductividad de las aguas tratadas.

Otra problemática asociada a estas infraestructuras radica en la dificultad de su gestión debido a diversas causas relacionadas con su localización en la cuenca, la antigüedad, los episodios de avenidas y escasez, las condicionantes ambientales, la existencia de presas y canales sin uso (Buseo, Elche, Elda, Relleu) y otras causas relacionadas con la policía de las zonas aledañas a los canales. Actualmente tienen que enfrentar condicionantes importantes como los caudales ecológicos, régimen de calidad de aguas, caudal sólido, conectividad fluvial, entre otros. El estudio del CEDEX denominado "Revisión de las avenidas de proyecto e identificación preliminar de necesidades de mejora de la capacidad de desagüe de las presas de la Demarcación Hidrográfica del Júcar (CEH, 2014b) indica que la presa de Sichar no cuenta con capacidad suficiente para enfrentar los eventos de avenida asociados, además de señalar que la presa de Arenós no puede alcanzar su capacidad de regulación por problemas deslizamiento de laderas.

4.4. Evaluación de los recursos hídricos en el sistema hidrográfico Mijares – La Plana. Efectos bajo un escenario de cambio climático

Esta es una tesis desarrollada en la Universidad Jaime I [9], cuyo objetivo se centra en evaluar la disponibilidad de recursos hídricos en el sistema hidrográfico Mijares-Castellón y cómo será impactado por el cambio climático. Cabe resaltar que fue desarrollada en el 2016 con los resultados del Assessment Report 5 (ARR5, IPCC).



En primera instancia, a través del análisis de la evapotranspiración determinan un valor de escurrentía regional de 349 hm³, similar a las demandas estimadas en el PHN 2025-2030 bajo un régimen climático normal.

En segunda instancia, se indica que para un escenario de un aumento térmico de 1°C y una reducción de la precipitación media de 5 %, los recursos hídricos totales pueden verse disminuidos hasta en un 22.5 %.

4.5. Trabajo de fin de máster: Estudio de Reutilización Integrada de las Aguas Regeneradas en el Tramo Final del Río Mijares (Sep,2017)

Este estudio tiene como objetivos primordiales analizar las alternativas de utilización de las aguas residuales en la Plana de Castellón para mitigar la sobreexplotación de aguas subterráneas en el interfluvio Palancia – Mijares, utilizando el PHJ (2015-2021) como medio de comparación de resultados.

Un dato interesante que aquí se precisa es que las demandas agrarias de la Fuente de Quart y La Llosa pertenecen al sistema de explotación Palancia, por lo que no son modelados en el sistema de explotación Mijares – Castellón, sin embargo, esto no concuerda con el escenario 3 del componente subterráneo. Se realiza también un resumen de las estaciones depuradoras analizadas, las cuales se encuentran convenientemente listadas en la Tabla 13.

EDAR	Vertido		Zona de vertido
	m ³ /día	m ³ /año	
CASTELLÓN DE LA PLANA	37.639	13.738.321	Emisario Submarino
BORRIANA	12.577	4.590.781	Vertido en la costa
ONDA - BETXÍ - VILA-REAL - ALQUERIAS	9.125	3.330.671	Delta Mijares
ALMASSORA	6.797	2.480.809	Delta Mijares
BENICÀSSIM	6.361	2.321.825	Emisario Submarino
LA VALL D'UIXÓ	4.119	1.503.346	Río Belcaire (reutilización)
VILA-REAL	3.559	1.298.934	Delta Mijares
MONCOFA*	3.385	1.235.525	Río Belcaire
NULES - VILLAVIEJA	3.295	1.202.675	Marjaleria de Nules
Total	86.857	31.702.887	

Tabla 13. Estaciones depuradoras analizadas

También se diferencia entre las depuradoras que permiten abastecer demandas de riego con agua reutilizada, así como los que sirven para el medio ambiente, como se muestran en la Tabla 14 y la Tabla 15.

REUTILIZACIÓN RIEGO	m ³ /año	Uso
CASTELLÓN DE LA PLANA	1.107.000	Reutilización en riego de parques y zonas publicas
LA VALL D'UIXÓ	1.503.346	Reutilización en riego
TOTAL REUTILIZACIÓN	2.610.346	Un 8 % del total

Tabla 14. EDARs utilizada para riego

REUTILIZACIÓN MEDIO AMBIENTE	m ³ /año	Uso
ONDA - BETXÍ - VILA-REAL - ALQUERIAS	3.330.671	Caudal ecológico del Delta del Mijares
ALMASSORA	2.480.809	Caudal ecológico del Delta del Mijares
VILA-REAL	1.298.934	Caudal ecológico del Delta del Mijares
NULES - VILLAVIEJA	1.202.675	Caudal ecológico de la Marjaleria de Nules
TOTAL REUTILIZACIÓN	8.313.089	Un 26 % del total

Tabla 15. EDARs utilizadas para medio ambiente



Refiere también la existencia de solo una desaladora en el sistema, la de Moncofar, con una capacidad de 30000 m³/día, ampliable hasta 60000 hm³/día, es decir puede abastecer a 120000 personas de la comarca de La Plana. La desaladora más cercanos al acuífero son las de Oropesa y la de Sagunto, de las cuales se puede contar con un volumen anual de 3 y 1.6 hm³/año, respectivamente, para reducir las extracciones de agua subterránea.

Se indica también que hidrogeológicamente el área de estudio incluye los sectores de masas de agua subterránea de Plana de Castellón, Media Palancia y Onda-Espadán, siendo las extracciones que se producen mucho más relevantes en las dos primeras masas que en la última, en específico en la zona del acuífero de la Rambleta, en donde la piezometría revela fenómenos de intrusión salina en una comparación 1970/1974 frente al 2008.

Un dato interesante es que la EDAR de Castellón y Benicassim ya tienen un emisario submarino, mediante el cual vierten al mar, sin embargo, la capacidad hidráulica de estos resulta insuficiente en épocas estivales, por lo que es importante realizar una operación conjunta.

De las conclusiones se puede extraer que existe la seria posibilidad de considerar otras EDARs como alternativas de reutilización, siempre que se establezca un marco jurídico adecuado y la inversión correspondiente, así como contar con las obras de adecuación para facilitar el proceso. La alternativa de reutilización tanto para riego como para caudales medioambientales se decanta por la solución más factible en estas circunstancias, incluyendo el análisis económico que ha de ser asumido, con demostrada factibilidad, por los regantes. Las mejoras de conductividad de agua potable representan un ahorro importante también de dinero.

4.6. ITGE SERIE. Manuales de utilización de acuíferos. Planas de Castellón y Sagunto (1990)

De aquí se extraen tres conclusiones fundamentales respecto al uso conjunto para solucionar los problemas de nuestra área de estudio:

- Una actuación que se podría emprender es la utilización de los sobrantes del río Mijares, en las épocas en que éstos existen y no se utilizan, para recarga artificial en la plana de Castellón. Su acción sobre zonas como las de Moncofa, Vila-real y Nules tendría efectos muy beneficiosos, Esta realización se ha simulado en el último modelo de flujo realizado (1983-1984), observándose que con una parte muy reducida de las pérdidas, antes citadas, se consigue estabilizar y aún recuperar positivamente la piezometría de los sectores afectados, frenando el proceso de intrusión salina existente.
- A corto plazo es necesario restringir la explotación en los acuíferos de la Plana y ubicar las nuevas explotaciones en los acuíferos calcáreos del interior. La prohibición debe ser terminante en las zonas donde se detectan ya niveles piezométricos por debajo del nivel del mar.
- La posibilidad de utilizar la recarga artificial como arma contra la intrusión marina que se produce en bastantes zonas costeras del acuífero, confiere un interés añadido. Las fuentes de recarga serían excedentes no regulados del río Turia en la plana de Sagunto y del R. Mijares en la plana de Castellón, No se descarta la utilización de aguas residuales tratadas de ciudades de Sagunto y Castellón, La amplia red de canales y acequias facilitarían el transporte de los caudales hasta las áreas de la recarga de los mismos en el acuífero mio-plio-cuaternario.

5. ELECCIÓN DE MODELO DE SIMULACIÓN

Actualmente existen una cantidad importante de modelos de simulación de gestión de recursos hídricos (water allocation models), aplicados en distintas latitudes y longitudes, con distinto grado de complejidad en cuanto a la modelación superficial y subterránea. Algunos de ellos son listados a continuación:

5.1. WEAP

WEAP (Water Evaluation And Planning) es una herramienta de modelación para la planificación y distribución de agua que puede ser aplicada a diferentes escalas, desde pequeñas zonas de captación hasta extensas cuencas. WEAP tiene una amplia base de usuarios en todo el mundo y está disponible en diferentes idiomas, incluido el español.

WEAP explícitamente incluye demandas de agua con prioridades asociadas y usa escenarios para evaluar diferentes esquemas de distribución del recurso. WEAP incluye un modelo hidrológico, así como varios módulos que permiten integrar WEAP con el modelo de agua subterránea MODFLOW y con el modelo de calidad del agua QUAL2K. WEAP también ha sido utilizado en conjunción con modelos socioeconómicos. En la Figura 18 se puede apreciar una vista de la interfaz gráfica[10]:

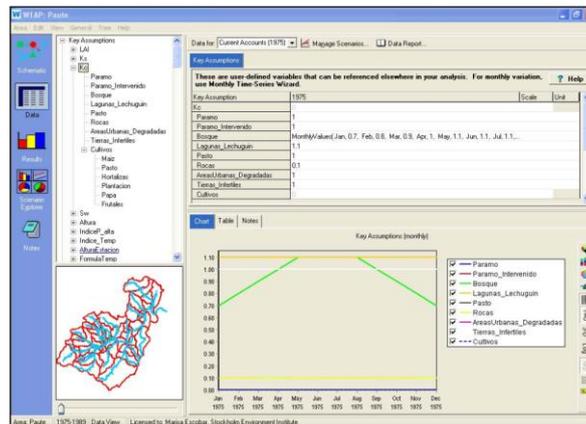


Figura 18. WEAP – imagen referencial

5.2. HYDRO-BID

El Sistema de simulación Hydro-BID incluye módulos de análisis hidrológico y climático para estimar la disponibilidad (volúmenes y caudales) de agua dulce a escalas regional, de cuencas y de subcuencas. Incluye también los análisis económicos y las herramientas de soporte de decisiones para estimar los costos y beneficios de las medidas de adaptación y ayudar a los responsables de tomar decisiones en la selección entre diseños alternativos de proyectos de infraestructura, así como entre políticas de gestión de recursos hídricos.

El sistema Hydro-BID genera salidas de información en forma de series de tiempo diarias de los flujos estimados para la localidad y el período escogidos. A discreción del usuario, estas salidas pueden ser resumidas en una serie de tiempo mensual [11]. En la Figura 19 se puede observar la interfaz gráfica de HYDRO-BID.

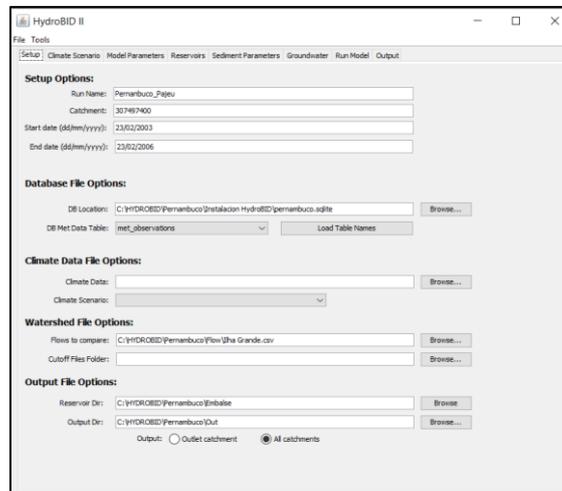


Figura 19. HYDROBID – imagen referencial

Cabe resaltar que una de las ventajas de HYDROBID es que cuenta con una base de datos para Latinoamérica y el Caribe, así como la integración directa con sistemas de información geográfica de licencia libre (QGIS).

5.3. SWAM

Los Modelos Simplificados de Distribución de Agua (SWAM, por su sigla en inglés), son modelos realizados por el Departamento de Recursos Naturales de Carolina del Sur (SCDNR, por su sigla en inglés) para las cuencas Edisto, Saluda y Salkehatchie (inicialmente) y pueden ser aplicados a muchas otras cuencas en el mundo.

Fue puesto en práctica con la empresa CDM Smith para las ocho principales cuencas del estado (en el año 2014), constando finalmente en una hoja de cálculo con programación en Visual Basic.

Los modelos SWAM están destinados a apoyar el desarrollo de planes hídricos regionales, de manera que se puedan abordar las necesidades de tener una herramienta de modelado de asignación de agua generalizada en red que pudiera ser aplicada fácil y simplemente para estudios de planificación para una amplia gama de usuarios finales. Actualmente es uno de los softwares más simplificados y de baja complejidad en cuanto a modelos de balance hídrico, por lo tanto, tiene limitaciones claras.

Como la mayoría de los softwares, SWAM calcula el agua disponible física y legalmente, las desviaciones, el almacenamiento, el consumo y los flujos de retorno en los nodos definidos por el usuario en un sistema fluvial en red. El modelo puede representar una variedad de tipos de usuarios de agua, incluidos los proveedores de agua municipales, los regantes agrícolas y los usuarios de agua industriales. Una de las ventajas claras de este modelo es que puede representar demandas variables en el tiempo, ya sean prescritas por el usuario o calculadas internamente. Puede incluir también análisis de reúso de aguas municipales e industriales, transferencia de tierras agrícolas, bombeo de aguas subterráneas, trasvases, etc. SWAM puede operar a escala diaria o mensual y la versión actual del modelo está restringido a 200 usuarios de agua en total [12]. En la Figura 20 se puede observar la interfaz del modelo.

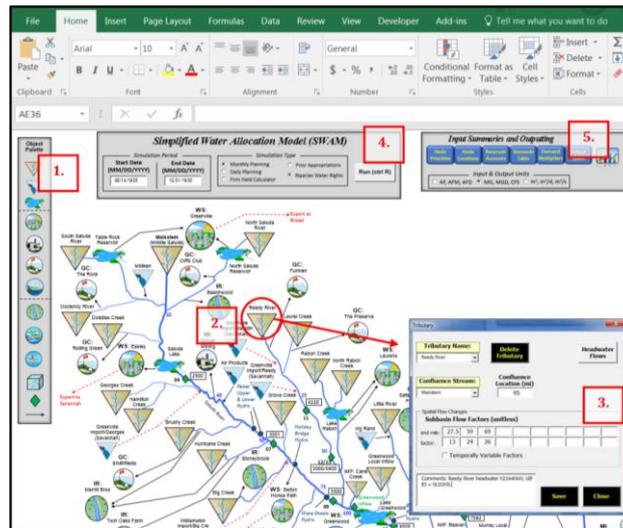


Figura 20. SWAM – imagen referencial

5.4. AQUARIUS

AQUARIUS es un modelo de gestión de recursos hídricos de cuencas basado en C++, desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) y cuya última revisión/actualización fue en el año 2005. Fue ampliamente utilizado en muchos países de Sudamérica, como Uruguay y Argentina. La versión 2005 soporta el modelado de aguas superficiales y subterráneas, estructuras de control (reservorios de almacenamiento, obras de salida de reservorio, estructuras de desvío, puntos de unión), dos tipos de estructuras de transporte (tramos de ríos y tuberías artificiales) y siete usos de agua (riego agrícola, generación de energía hidroeléctrica, recreación interna, suministro de agua municipal e industrial, recreación de embalses y área de control de inundaciones) [13].

Un aspecto interesante de este software es que adopta un criterio de eficiente económica para determinar la asignación de agua. Este criterio de decisión requiere reasignar los caudales de los arroyos hasta que los rendimientos marginales de todos los usos de agua sean iguales. Los usos están representados por beneficios marginales. Esto se aplica lógicamente para planificar asignaciones futuras. Para asignaciones predeterminadas el modelador puede simplemente configurar el modelo para que suceda o tiene la opción de jugar con curvas de demanda sustitutas hasta que se alcance el nivel requerido de asignación de agua, de manera que se pueda analizar el nivel de subsidio económico futuro que ha de necesitar un uso. Actualmente solo permite un paso de tiempo mensual, aunque fue concebido también para días y semanas. A diferencia de muchos modelos, este modelo no hace uso de las prioridades para usos. La Figura 21 muestra la interfaz gráfica de usuario.

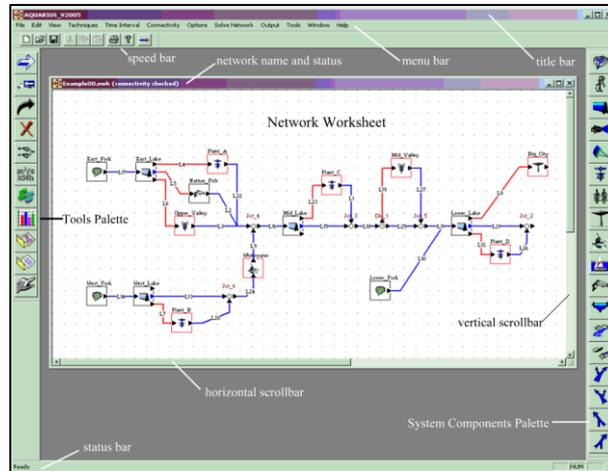


Figura 21. AQUARIUS – imagen referencial

5.5. WRAP TEXAS

El Water Rights Analysis Package (WRAP) modeling system fue desarrollado por la Universidad de Texas bajo el auspicio principalmente de la Comisión de Texas sobre el Medio Ambiente, durante los años 1997-2003, para obtener un modelo de disponibilidad de todo el estado de Texas. Su sistema de análisis, como otros modelos, se basa en la prioridad de uso (que en este caso se llaman derechos de uso). El modelo facilita las evaluaciones de la disponibilidad y confiabilidad del agua hidrológica e institucional para satisfacer los flujos en ríos, suministros, generación de energía hidroeléctrica y almacenamiento de embalses. Se pueden simular también operaciones de embalses para control de inundaciones, así como rastrear concentraciones de salinidad. Pese a que fue diseñado para Texas, puede ser aplicado en cualquier lugar. Los intervalos de análisis pueden ser mensuales o diarios.

En sí WRAP es un set de programas de cómputo, en el que el respectivo para realizar balances de recurso hídrico a escala mensual, sería el programa SIMD. Los demás están asociados al postproceso, a la simulación diaria, evaluación de salinidad e input de datos hidrológicos. La Figura 22 muestra la interfaz gráfica del modelo, la cual ciertamente es muy poco amigable e intuitiva.

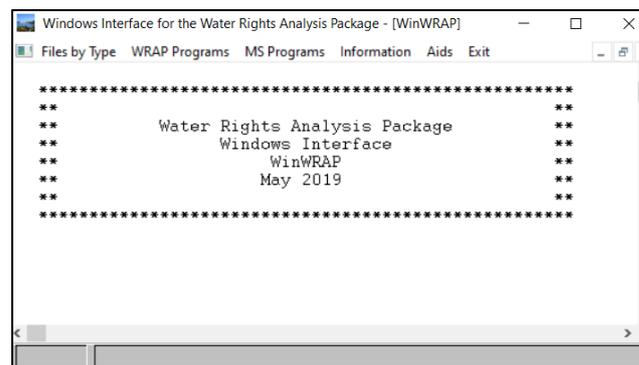


Figura 22. WRAP – imagen referencial

5.6. AQUATOOL

Aquatool es un software que incorpora distintos módulos para el análisis de los recursos hídricos, así como análisis de distribución del recurso hídrico, análisis de calidad de aguas, optimización, entre otros. A través de estas funcionalidades se puede analizar la gestión de cuencas hidrográficas y distintas opciones de uso conjunto, como reúso de aguas, recarga de acuíferos, desalinización, bombes, etc.

Una de las principales ventajas de este entorno es la facilidad de hibridación con módulos de aguas subterráneas, de manera que se pueda hacer una simulación conjunta del recurso hídrico, facilitando análisis de sobreexplotación, zonas ideales de recarga, etc. Puesto que puede acoplarse al módulo de aguas subterráneas AQUIVAL que soluciona las ecuaciones diferenciales de aguas subterráneas con el método de autovalores [14].

Actualmente este software es utilizado en la planificación hidrológica de todas las cuencas españolas como por ejemplo para la actualización del plan de emergencia de sequías de Barcelona en 2016. Además, se ha utilizado en México y en otros contextos geográficos. En la Figura 23 se visualiza una imagen del módulo SIMGES.

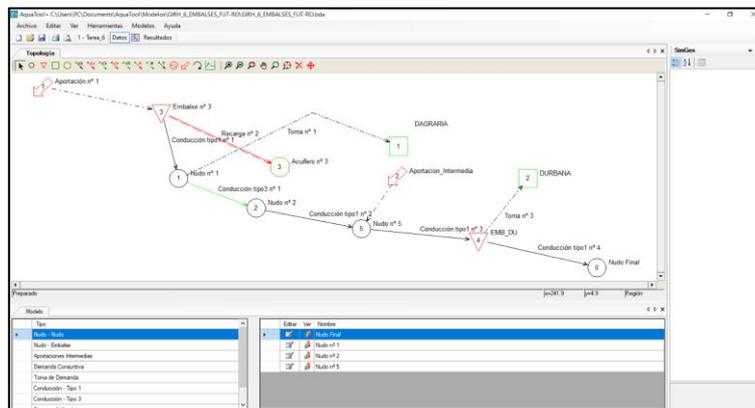


Figura 23. Aquatool (SIMGES) – imagen referencial

Naturalmente, en esta investigación se ha adoptado el uso del modelo AQUATOOL dado que se parte de un modelo base desarrollado en SIMGES de la cuenca del río Mijares. Por otro lado, la facilidad de integración un modelo superficial – subterráneo, la posibilidad de incorporar archivos de entrada con Access y la manera intuitiva de poder modelar son puntos a favor que convergen para utilizar no solo en este sino en otros contextos AQUATOOL.

6. MODELACIÓN Y CALIBRACIÓN DE RESULTADOS

La modelación se ha dividido principalmente en dos componentes: el componente superficial, modelado con SIMGES y el componente subterráneo, modelado con AQUIVAL.

No obstante, ese capítulo se divide en tres secciones debido a su condición híbrida: Montaje del modelo en SIMGES, Componente subterráneo y Componente superficial. Esta consideración es debido a que el componente superficial es calibrado principalmente con los volúmenes del embalse Sicha, Arenós y su suma, pero para simular este sistema se deben contar con el módulo subterráneo ya ejecutado. Sin embargo, el módulo desarrollado en AQUIVAL se calibra con los niveles piezométricos en algunos puntos (como se explicará en el apartado respectivo) y para que esto pueda llevarse a cabo, se debe contar ya con el componente superficial montado.

En otras palabras, primero ha de montarse el modelo en SIMGES, luego elaborar el modelo subterráneo y calibrarlo con el modelo en SIMGES y luego comprobar evaluar el performance del modelo híbrido, en el que se encuentren calibrado el componente subterráneo con el Acuífero Plana de Castellón y el componente superficial con el embalse Schar.

6.1. MONTAJE DEL MODELO HÍBRIDO SUPERFICIAL-SUBTERRÁNEO

El modelo es desarrollado con el módulo SIMGES en símil con el módulo AQUIVAL para el componente subterráneo. El primer paso es desarrollar la topología del modelo, para el cuál se ha tomado en cuenta un modelo base similar al presentado en el Plan Hidrológico del Júcar de 2015-2021 [5], cuya configuración se muestra en la Figura 24:

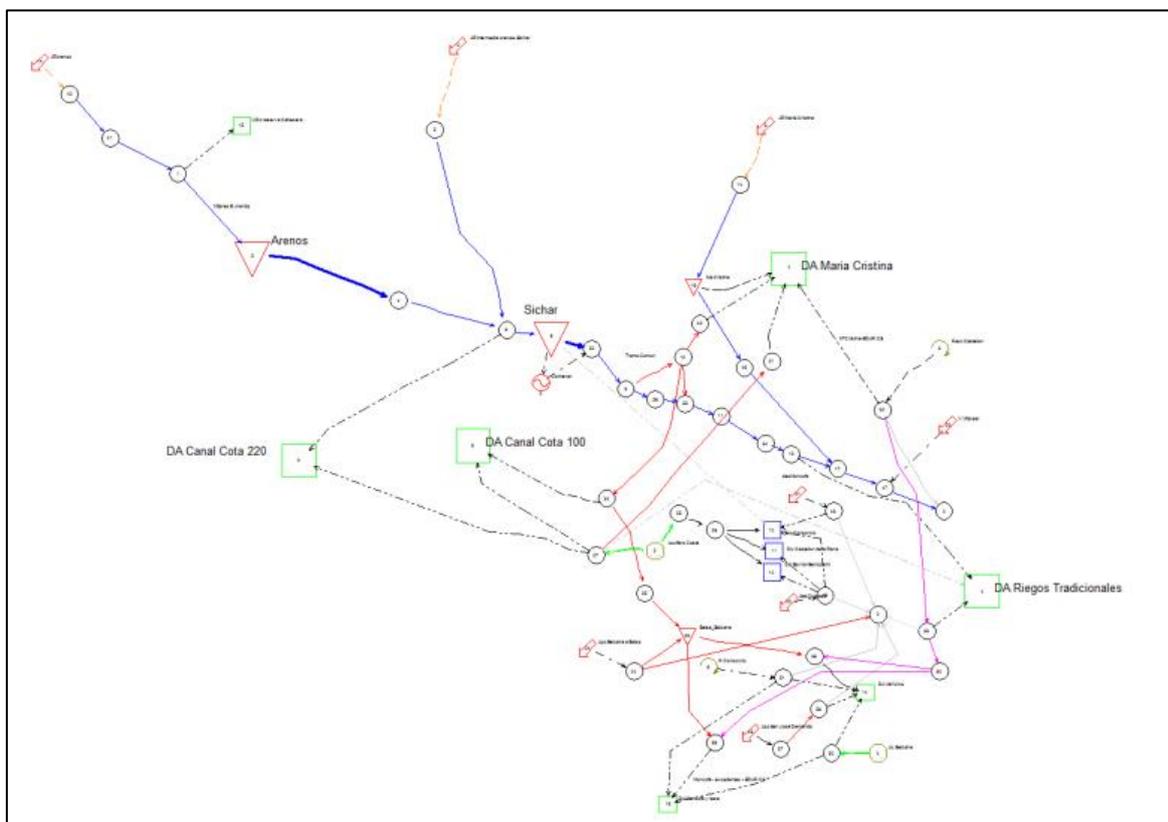


Figura 24. Esquema topológico en SIMGES del S.E. Mijares – Plana de Castellón del PHJ 2015-2021

Este modelo base contempla la modelación de los dos acuíferos, tanto de la Plana de Castellón como el de Palancia, pero con el método de acuífero tipo depósito, lo que limita en gran medida el análisis del impacto de la gestión del agua en la sobreexplotación de las aguas subterráneas, sobre todo en las áreas identificadas con mayor abatimiento.

Para tales fines, se han incorporado algunas ligeras modificaciones a la topología ya presentada, tales modificaciones se presentan a continuación:

- Se ha considerado solo el elemento de análisis del acuífero de la Plana de Castellón, con metodología autovalores.



- Esta consideración viene a ser la más importante porque todos los elementos conectados al acuífero Belcaire (que viene a ser parte de Plana de Castellón + parte del Palancia) han sido modificados para que las demandas se abastezcan del elemento acuífero tipo autovalores Plana de Castellón. Como estos elementos impactaban principalmente en la zona de la Vall d'Uixó, Moncofa y Fuentes de Quart y La Llosa, este impacto ha sido reflejado en las celdas de la zona Sur del acuífero modelado con AQUIVAL.
- Las demandas conectadas al acuífero Belcaire del modelo original han sido reemplazadas por elementos de tipo "Bombeo adicional" de manera que se puede especificar de manera diferenciada (por UDA) las zonas que afectan dentro del acuífero autovalores.
- Las demandas conectadas al acuífero Costa (parte de la masa de Plana de Castellón) han sido modificados e independizados con elementos tipo "Bombeo Adicional" ya que, si se mantienen como el modelo original, con elementos unidos, no se podría especificar el impacto que hacen de manera diferenciada en distintas zonas del acuífero (tanto su bombeo como su infiltración).
- La distribución de todos los elementos ha sido modificada para que guarde concordancia espacial entre ellos con una imagen de fondo.
- Se ha incorporado el elemento "recarga de lluvia" como es propuesto en la tesis doctoral de Dr. Pérez-Martín [15].
- Se modificaron los siguientes nombres de las demandas urbanas, acorde a la información oficial:
 - DU Consorcio por Consorcio de Aguas de la Plana.
 - DU Castellón de la Plana por Subterráneos Castellón de la Plana.
 - DU Burriol-Benicasim por Subterráneos de Plana de Castellón.
- Se incorporaron los caudales ecológicos reales en el elemento "Qeco Schar" puesto que estaban especificados con un valor de 0 siendo estos especificados en el Anexo 5 del PHJ 15-21 [5].
- Se realizó una revisión general de los datos que se habían ingresado previamente en el modelo, encontrándose algunos defectuosos tales como las prioridades y algunos datos particulares de demandas, sin mayor relevancia por ser posiblemente error de tipeo.
- Se realizó una redistribución espacial de los elementos acorde a una imagen de fondo para que al activarse esta en el software AQUATOOL pueda mejorar la representación espacial de los elementos.

La incorporación de todas estas modificaciones se ven reflejadas en la topología final del modelo como se presenta en la Figura 25:

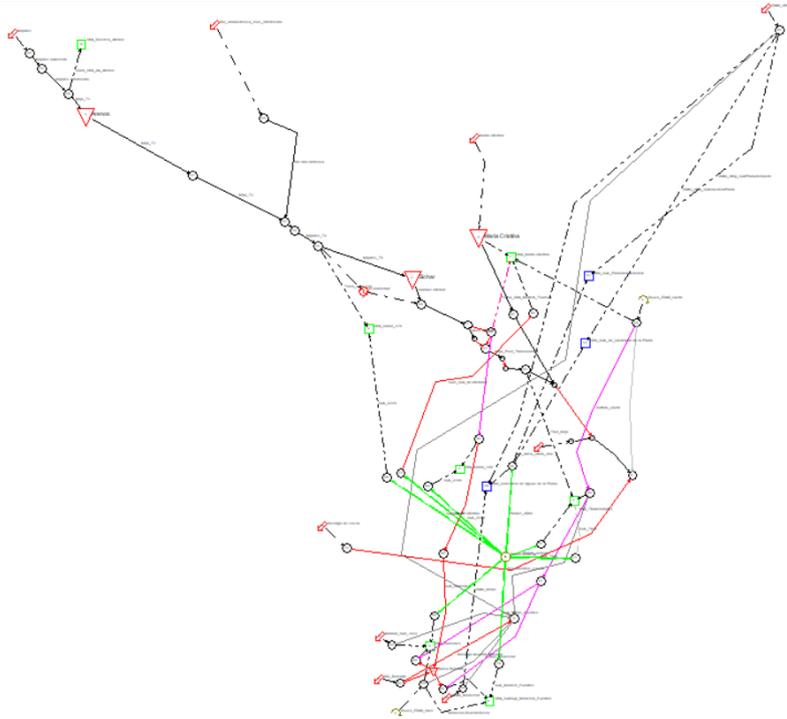


Figura 25. Configuración topológica final en SIMGES

6.2. COMPONENTE SUBTERRÁNEO

La modelación del componente subterráneo ha sido realizado con el modelo AQUIVAL el cuál toma en cuenta las ecuaciones diferenciales del movimiento del agua en aguas subterráneas pero cuyo esquema de resolución es el de Autovalores [14]. Además de ello, este modelo permite un análisis distribuido de las masas de aguas subterránea.

Para este caso de estudio, se cuenta en el Interfluvio Palancia-Mijares con 04 masas de aguas subterránea:

Nombre	Código
Plana de Castellón	080.127
Onda - Espadán	080.126
Medio Palancia	080.130
Plana de Sagunto	080.128

Tabla 16. Masas de agua subterránea en el Interfluvio Palancia-Mijares

Entre estas masas de agua subterránea, las más importantes son 2: Plana de Castellón y el Medio Palancia, sin embargo, para el esquema de modelización se considerará solamente el acuífero de la Plana de Castellón por ser el más representativo en cuanto a demandas, área cubierta y porque en esta masa de agua subterránea es en donde se nota la mayor influencia de la sobreexplotación y consecuentemente avance de la cuña salina.



Además de ello, siendo uno de los acuíferos de mayor relevancia en el litoral de la CHJ, se cuenta con algunos estudios previos que nos proveerán de datos de valía para el modelo. No obstante, sí se tendrán en cuenta las UDAs que se abastecían tanto del acuífero Medio Palancia como de la Plana de Castellón, solo que se especificará la influencia principalmente en la zona sur del acuífero.

6.2.1. Estudios antecedentes asociados

Dada la relevancia del acuífero, hay estudios antecedentes asociados que han permitido caracterizar en gran medida y en distintos espacios el acuífero, los cuales se listan a continuación:

- Mapa Hidrogeológico de España. 1985
 - Este es el documento gráfico más antiguo obtenido sobre datos litológicos e hidrogeológicos de España, publicado por el Instituto Geológico y Minero de España. La zona de interés es la Hoja 56, en la que se aprecia la litología y algunas isopiezas en la zona litoral de la Plana de Castellón.
- Serie. Manuales de utilización de Acuíferos. Planas de Castellón y Sagunto. 1989
 - Esta es una de las primeras publicaciones (sino la primera) que brinda datos espacialmente distribuidos de transmisividad y coeficiente de almacenamiento en el acuífero Plana de Castellón, los cuáles son mostrados a través de 2 figuras en el capítulo 4: "Hidrogeología". Estos corresponden a datos recopilados en abril de 1972 a marzo de 1973.
- Las Aguas Subterráneas de España. 1993
 - En el capítulo 2: "Los sistemas acuíferos" de este documento emitido por el Instituto Tecnológico Geominero (ITGE) de España se encuentran información relacionada a las variables hidrogeológicas características que debe tener un suelo en función a su litología y en el capítulo 14: "Cuenca del Júcar" se encuentran planos de isopiezas del acuífero Plana de Castellón.
- Revisión y documentación de un modelo de simulación de acuífero por el método de los Autovalores. 2000
 - Este documento es una Trabajo de Fin de Grado (TFG) que ha documentado convenientemente modelos de simulación con autovalores. De aquí se desprende información valiosa sobre las consideraciones que se han tenido en cuenta para modelar en AQUIVAL el acuífero de la Plana de Castellón.
- Comprobación y evaluación en la Cuenca Piloto del río Júcar de las guías desarrolladas en el marco de la estrategia común para la implementación de la Directiva Marco del Agua. 2006.
 - Aunque en la web no se encuentra este documento publicado completamente, sí se ha podido obtener el Anexo 04. "Mapa piezométrico general de la Confederación Hidrográfica del Júcar. Memoria" en el que se presenta por primera vez el Mapa Piezométrico General a fecha mayo 2005 de toda la confederación. Sin lugar a duda uno de los mapas hidrogeológicos más valiosos de momento en lo que respecta al acuífero Plana de Castellón.
- Caracterización Hidrogeoquímica de los Procesos de Salinización en el Acuífero Detrítico Costero de la Plana de Castellón (España). 2008
 - En el capítulo 3: "Acuífero Pliocuaternario de la Plana de Castellón" se muestran dos imágenes muy interesantes en las que reflejan la distribución de los 2 parámetros característicos de una masa de agua subterránea: la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento, pero en el acuífero Plana de Castellón.



- Las Aguas Subterráneas en la Planificación Hidrológica. 2012
 - El Instituto Geológico y Minero de España presenta en este documento una serie de estudios de apoyo para los análisis de aguas subterráneas, entre ellos el Mapa Piezométrico de España que se logra con la Actividad 5. Elaboración del Mapa Piezométrico de España del Proyecto Encomienda de gestión para la realización de trabajos científicos-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas (2009); aquí se muestra una piezometría bastante detallada de la confederación hidrográfica del Júcar para el periodo 1970-1974 y mayo del 2008.
- Informe de evolución de niveles piezométricos de la demarcación hidrográfica del Júcar. Año Hidrológico 2017-2018. 2018
 - Este informe elaborado por la confederación muestra la evolución piezométrica de los pozos de monitoreo concernientes a la red representativa del acuífero de la Plana de Castellón. Si bien es cierto no da información de mucha valía para el estudio, pero en particular el pozo 08.12.017 nos brinda valores de la zona de la Vall d'Uixó.
- Esquema de Temas Importantes (ETI) de la Demarcación Hidrográfica del Júcar 2022-2027. 2020.
 - En el capítulo 5: "Anexos" se encuentra el Tema 10 propuesto por la confederación en la que se muestra dos imágenes bastante ilustrativas del cambio que ha habido en la configuración y valores de las isopiezas en la zona litoral del acuífero de la Plana de Castellón.
- Red Piezométrica de la Confederación Hidrográfica del Júcar. 2021
 - La red piezométrica de la CHJ (puntos georeferenciados) así como la data histórica de los valores de niveles piezométricos han sido extraídos del Sistema de Información del Agua (SIA) de la Confederación Hidrográfica del Júcar. [16]

Es importante considerar que todos los estudios y mapas piezométricos que muestran un abatimiento considerable del nivel piezométrico en la zona de la Vall d'Uixó es debido a los niveles registrados en el pozo Miramar (La Rambleta I).

6.2.2. Discretización del acuífero en el modelo

Para la discretización del acuífero se ha considerado la primera modelación realizada por M. Varela [17], y que ha sido convenientemente revisado y documentado por Luis Blanco[18] en la que se consideró un modelo en diferencias finitas (Prickett), dividiendo el acuífero en planta mediante una malla de 23 filas y 21 columnas, cada una de las celdas definidas es un rectángulo de 2 km de ancho por 1 km de alto, como se muestra en la Figura 26. Nótese que en esta figura el valor de 0 se considera una celda inactiva, el valor de 1 es una celda activa y el valor de 2 es una celda de nivel constante.

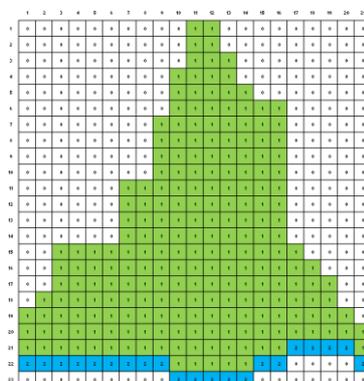


Figura 26. Discretización del Acuífero de la Plana de Castellón basado en Varela (1983).



Una vez teniendo el acuífero discretizado, se procedió a consignar valores de transmisividad y coeficiente de almacenamiento.

Aunque en esta sección se resume, la determinación de los valores de transmisividad (T) y coeficiente de almacenamiento (S) óptimos para el acuífero ha sido donde se ha requerido mayor esfuerzo.

Inicialmente se tenía un modelo con valores de Tx, Ty y S espacialmente distribuidos como se visualiza en la Figura 27.

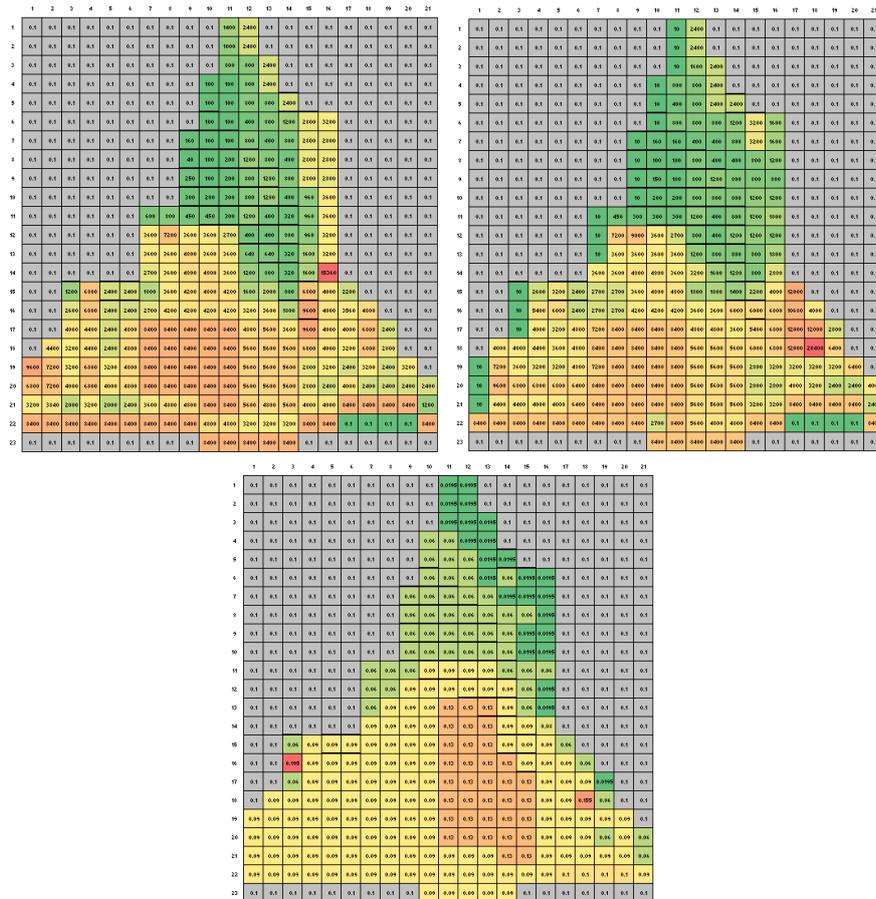


Figura 27. Distribución inicial de parámetros Tx, Ty y S

Esta distribución fue modificada debido a que luego de la integración con el modelo AQUATOOL, los resultados no eran satisfactorios.

Posteriormente se debe realizar una discretización de las acciones elementales consideradas en nuestro modelo, las cuáles se listan a continuación:

- Unidades de Demanda Agraria (UDAs): Riegos Tradicionales, Canal Cota 100, Canal Cota 220, C.R. M.I. Canal de María Cristina, Moncofa + Fuentes de Quart, la Vall d'Uixó).
- Filtraciones: Embalses (Sichar y María Cristina), Tramo Común, Tramo post tramo común, Tramo post confluencia con Rambla La Viuda, Río Belcaire y UDAs (Canal 220, Canal 100, C.R. M.I. Canal de María Cristina y la Vall d'Uixó).



- Unidades de Demanda Urbana (UDUs): Bombeos Urbanos (que englobará las UDUs Consorcio de Aguas de la Plana, Subterráneos de Castellón de la Plana y Subterráneos de Plana de Castellón).
- Recarga Uniforme de Lluvia.

* Nota: Algunas acciones elementales corresponden tanto para la extracción de la UDA como para su infiltración, ya que afectan al mismo conjunto de celdas.

Las celdas afectas (color verde) según las acciones elementales se pueden observar en el Anexo 2:

Luego se procedió a especificar cuáles iban a ser los parámetros de control que nos iban a permitir estudiar los resultados de manera eficiente, principalmente de cara a la etapa de calibración. Los parámetros de control fueron los siguientes tipos:

- Nivel piezométrico medio: 08.13.005-Miramar Rambleta I (en la celda coincidente con la isopieza de menor elevación, la cual corresponde a la isopieza de -50 msnm [19]), 08.12.017-Xilxes (considerado por ser representativo según la CHJ), 08.12.049-Veo Sur, 08.12.049 Veo Intermedio, 08.12.014 Veo Norte y 08.12.015- Mijares.
- Volumen almacenado en todo el acuífero: VT (para cuantificar en términos de volumen el balance de agua en el acuífero).
- Volumen almacenado en un conjunto de celdas: Ptos. de Control (puntos repartidos aleatoriamente en el acuífero dependiendo de la zona que se desee evaluar), V. María Cristina (zona del acuífero en contacto y cercanía del embalse María Cristina).
- Caudal por todo el contorno: CT (para cuantificar en términos de caudal el balance de agua en el acuífero).
- Caudal de salida por un conjunto dado de celdas de contorno: Salida al mar ZNorte, Salidas al mar ZIntermediaNorte, Salida al mar ZIntermediaSur y Salida al mar ZSur. Esta zonificación es para evaluar la salida de caudal según la zona litoral del acuífero que estemos evaluando (o en el futuro se desee evaluar). Como la zona de interés es la del Interfluvio Palancia-Mijares y la zona de sobreexplotación es la zona de la Vall d'Uixó, la zona que nos interesa será la "Salida al mar ZIntermediaSur". En adelante cuando se analicen los aspectos de intrusión salina y se refieran a "caudal de intercambio litoral" se referirán a los caudales resultados de estos puntos de control (zona litoral crítica), siendo los valores negativos procesos de intrusión salina.

Los puntos de control antes mencionados también se pueden visualizar en el Anexo 2:

Es importante recalcar que los puntos de control de tipo Nivel Piezométrico medio fueron elegidos luego de superponer el modelo del acuífero con una imagen en la que se visualizan los niveles piezométricos con las isopiezas [19], como se muestra en la Figura 28, de manera que se pueda minimizar la cantidad de puntos de control para evaluar el desempeño de la modelación subterránea.

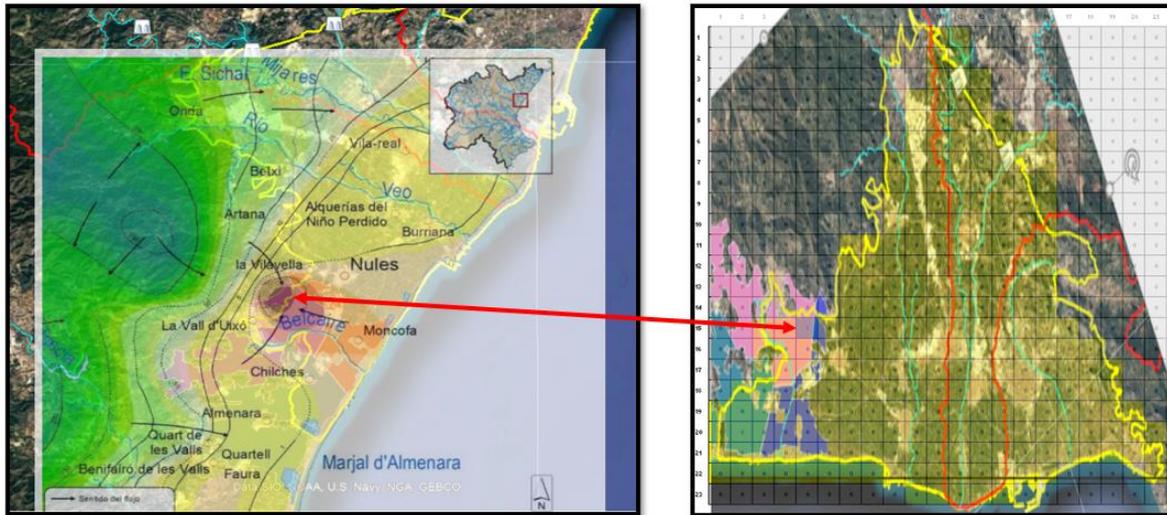


Figura 28. Análisis visual para elección de puntos de control (Caso Miramar)

La isopieza cuyo registro genera el nivel piezométrico de -50 msnm se encuentra influenciada principalmente, según su ubicación espacial, por los registros del piezométrico Miramar (Rambleta I), ubicado en el límite entre la masa de Agua Subterránea Onda-Espadán y Mijares-Plana de Castellón, pero perteneciente a la zona de la UDA de la Vall d'Uixó, como se aprecia en la Figura 29.

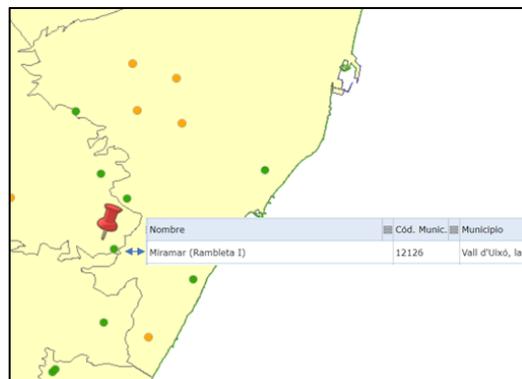


Figura 29. Ubicación de piezómetro Miramar. Fuente. SIA Júcar.

Lo demás piezómetros elegidos corresponden a piezómetros dentro de la zona de influencia cercana a la Zona de la Vall d'Uixó. La lista completa de piezómetros considerados y elegidos finalmente se pueden visualizar en la Tabla 17.

Código	Nombre	Años disponibles	Elegido
08.13.005	Miramar (Rambleta I)	24	Sí
08.20.012	- [No registra]	2	No
08.13.006	- [No registra]	2	No



08.12.015	- [No registra]	48	Sí
08.12.014	- [No registra]	47	Sí
08.12.003	- [No registra]	16	Sí
08.12.049	- [No registra]	27	Sí
08.12.017	- [No registra]	49	Sí
08.12.051	- [No registra]	1	No

Tabla 17. Piezómetros considerados para el análisis de calibración

Estos piezómetros también han sido ubicados espacialmente puesto que tienen que ser aproximados como puntos de control en el modelo. La distribución espacial de los piezómetros elegidos (cian) y no considerados (rojo) se visualizan en la Figura 30:

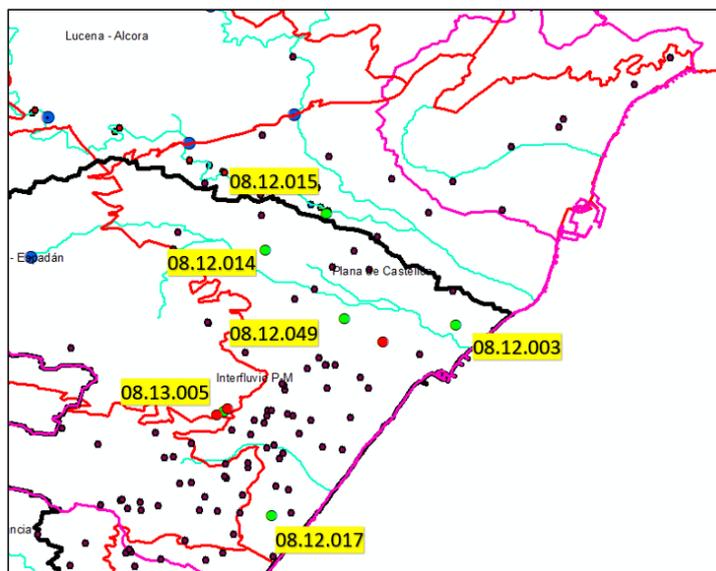


Figura 30. Distribución espacial de piezómetros analizados

6.2.3. Simulación y calibración del componente subterráneo

Con esta configuración del modelo se hicieron simulaciones tanto en el módulo AQUIVAL (agregando intensidades y alturas iniciales) como en el modelo SIMGES (el cuál incorpora el modelo de autovalores configurado en AQUIVAL).

Es importante resaltar que el modelo incorporado en SIMGES trabaja de manera híbrida con AQUIVAL por lo que todos los datos del componente subterráneo propiamente dicho se trabajan previamente en AQUIVAL como se ha mencionado, con excepción de uno que es la recarga por acción de lluvia. Este elemento ha sido incorporado de manera independiente directamente en el modelo SIMGES con vínculo directo en el acuífero de autovalores, consignando los valores de recarga obtenidos por P. Martín (2005) [15].

Luego de obtener las primeras simulaciones, se procedió a realizar una calibración de los resultados obtenidos partiendo del modelo de simulación de las aguas subterráneas. Esto significó calibrar principalmente las variables de transmisividad y coeficiente de almacenamiento.

En esta etapa se procedió a calibrar los coeficientes de transmisividad y almacenamiento del modelo de AQUIVAL, para lo cual se identificó primeramente un problema importante que se desprende de la Figura 27 en donde se puede observar que los coeficientes característicos de todo el acuífero varían de celda a celda, lo cual es algo que difícilmente se da en la realidad y atenta contra el principio de parsimonia al realizar modelos hidrogeológicos.

Por este motivo, se buscó zonificar el área de estudio y obtener así coeficientes de transmisividad y almacenamiento característicos.

La primera estrategia de zonificación se realizó empleando la información litológica de la zona de estudio, para lo cual se utilizó el visor del Instituto Geológico y Minero de España a escala 1:200 000 [20], como se aprecia en la Figura 31.

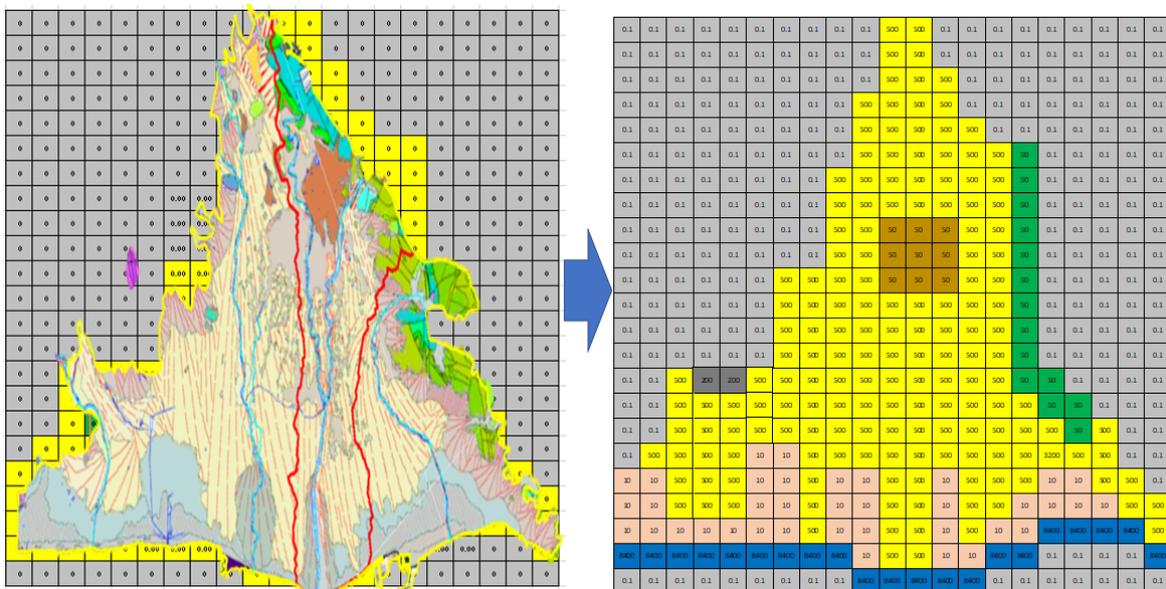


Figura 31. Zonificación del modelo según litología del IGME

Lamentablemente hay muy pocas fuentes a utilizar en las que vinculen características litológicas en acuíferos con valores característicos de transmisividad y coeficientes de almacenamiento. La aproximación realizada para este caso fue acorde a una publicación utilizada por el IGME [21] y que se puede visualizar en la Tabla 18 para valores de transmisividad y en la Tabla 19 para los valores de coeficiente de almacenamiento:



Clasificación de terrenos por su transmisividad ($m^2/día$)
(Adaptado de Custodio y Llamas, 1983)

T	1	10	10 ²	10 ³	
Calificación	Impermeables	Poco permeable	Algo permeable	Permeable	Muy permeable
Calificación del acuífero	Sin acuífero	Acuífero muy pobre	Acuífero pobre	Acuífero de regular a bueno	Acuífero excelente
Tipo de materiales	Arcilla compacta. Pizarra. Granito.	Limo arenoso. Limo. Arcilla limosa.	Arena fina. Arena limosa. Caliza poco fracturada. Basaltos.	Arena limpia. Grava y arena. Arena fina. Caliza fracturada.	Grava limpia Dolomías, calizas muy fracturadas.

Tabla 18. Clasificación de terrenos según su transmisividad [21]

CUADRO 2-4

Valores del coeficiente de almacenamiento (S)
(Villanueva e Iglesias, 1984)

Tipo de material permeable	Forma de funcionamiento del acuífero	Valores de S (medio)
Kárstico:		
Calizas y dolomías jurásicas	Libre	2×10^{-2}
	Semiconfinado	5×10^{-4}
	Confinado	5×10^{-5}
Calizas y dolomías cretácicas y terciarias	Libre	$2 \times 10^{-2} - 6 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	$10^{-3} - 5 \times 10^{-4}$
	Confinado	$10^{-4} - 5 \times 10^{-5}$
Poroso integranular:		
Gravas y arenas	Libre	$5 \times 10^{-2} - 15 \times 10^{-2}$
	Semiconfinado	10^{-3}
	Confinado	10^{-4}
Kársticos y porosos:		
Calcarenitas marinas terciarias	Libre	$15 \times 10^{-2} - 18 \times 10^{-2}$

Tabla 19. Clasificación de terrenos según su coeficiente de almacenamiento [21]

Naturalmente, estos coeficiente aunque son referenciales, presentan un margen de error importante, puesto que si se clasifican los valores de transmisividad consignados por Varela [17] y redocumentados por Luis Blanco [18], el acuífero de La Plana de Castellón tendría una transmisividad promedio de 4000 m^2/d , con valores extremos de 15000, lo que lo convertiría en un acuífero ultrapermeable (considerando que para el IGME los valores mayores a 1000 son acuíferos muy permeables).

Al realizar las pruebas respectivas con este criterio de zonificación, se obtuvieron los valores como se observan en la Figura 32 para el componente subterráneo, en donde el parámetro de control azul es el pozo 08.13.005 Miramar-Rambleta en donde se registra mayor abatimiento de niveles piezométricos y el parámetro de control amarillo es en el pozo Xilxes, una zona un poco alejada del primer pozo:

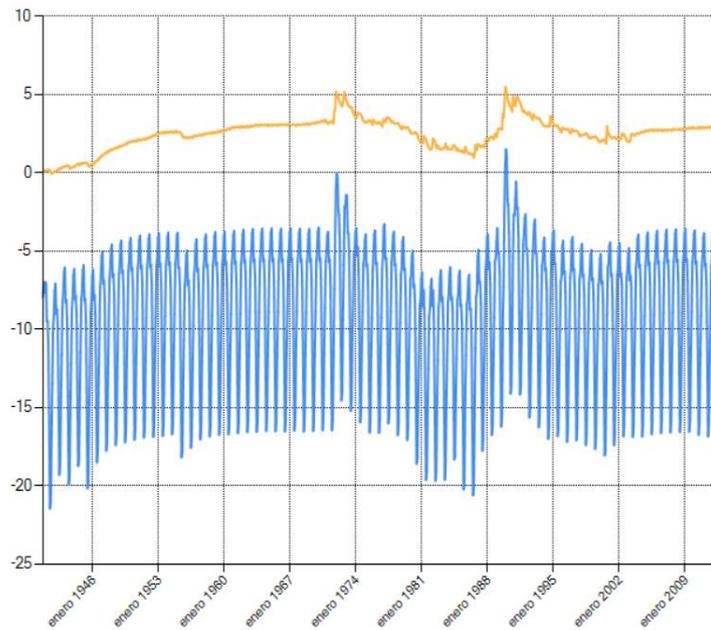


Figura 32. Primeros resultados de calibración del modelo subterráneo (2 parámetros de control)

Como se puede observar, los parámetros de control que buscan representar las isopiezas no son las ideales, puesto que el nivel de la isopieza que debería llegar a valores próximos a -50 msnm, llegan a -10 en promedio.

Por ello, se siguieron realizando pruebas de calibración hasta encontrar una zonificación presentada en la Tesis doctoral de la Ing. Giménez [22] y en la cual se referenciaba el estudio por el ITGE [23] quienes fueron los que la elaboraron en el año 1989-1990 un estudio bastante detallado del Acuífero de la Plana de Castellón y de Sagunto, en el que presentaron una zonificación de transmisividades y coeficiente de almacenamiento para el acuífero. Ambas zonificaciones, que son las mismas, pero con diferente presentación, son presentadas en la Figura 33 y en la Figura 34:

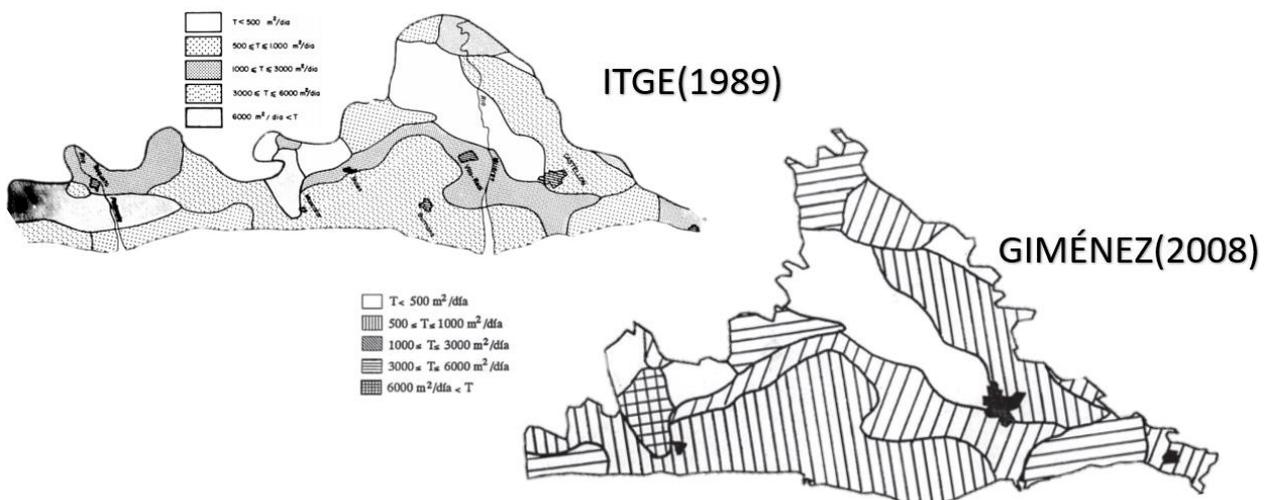


Figura 33. Zonificación según transmisividades del acuífero de la Plana de Castellón

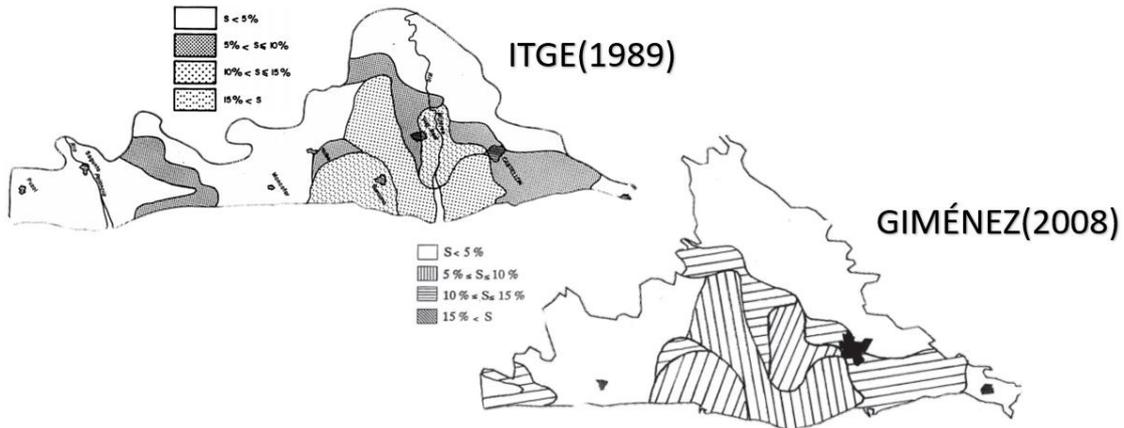


Figura 34. Zonificación según coeficientes de almacenamiento del acuífero de la Plana de Castellón (según diversas fuentes)

Finalmente se utilizó la zonificación presentada por Giménez (2008) como se observa en la Figura 35 y Figura 36, y en esta se especificaron los valores promedio en el rango que se proporcionaba en la leyenda de la figura de Giménez.

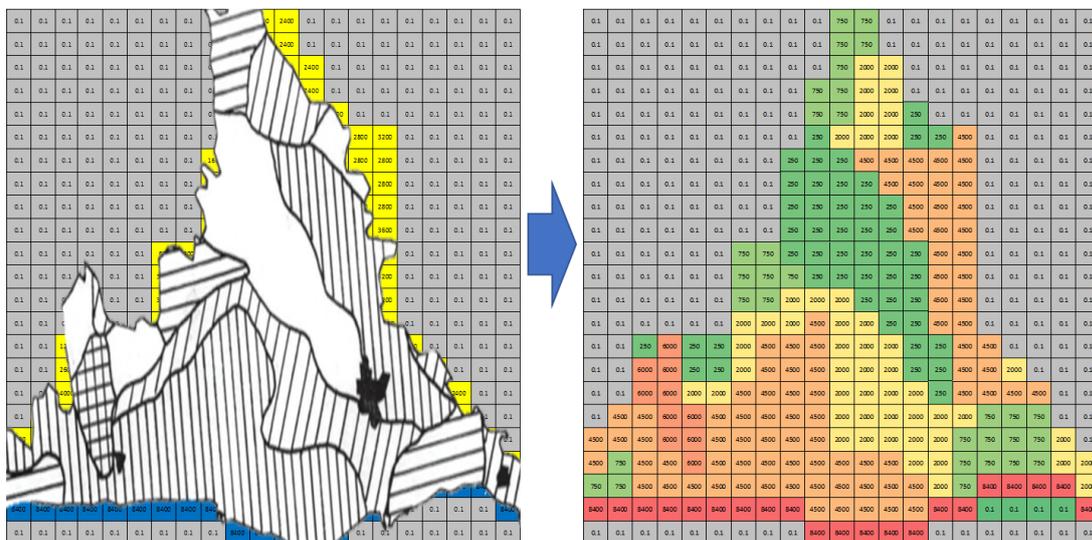


Figura 35. Zonificación definitiva según transmisividades

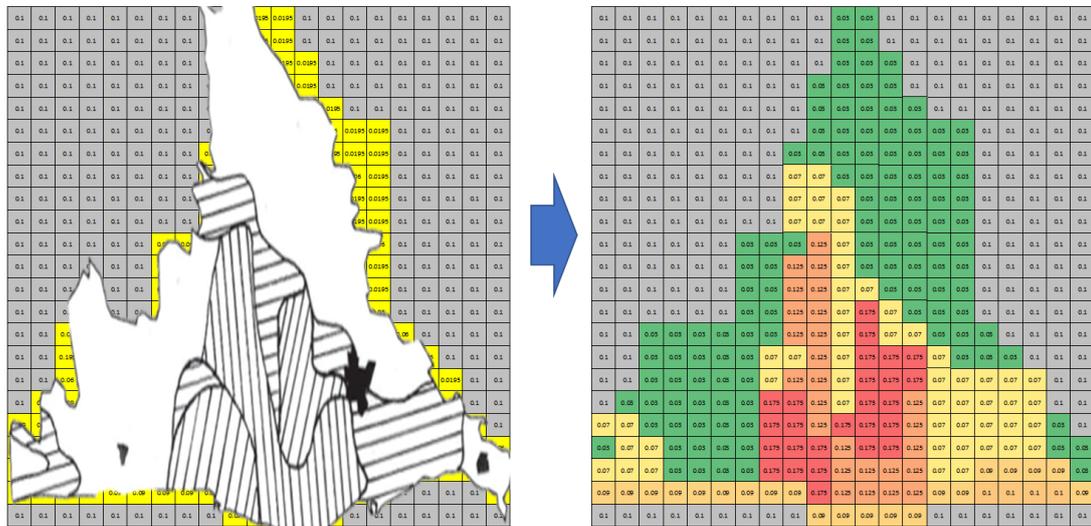


Figura 36. Zonificación definitiva según coeficientes de almacenamiento

Los valores de transmisividad y coeficiente de almacenamiento promedio consignados son los que se muestra a continuación:

Transmisividad		Coeficiente de almacenamiento	
Rango	Promedio/adoptado	Rango	Promedio
$T < 500 \text{ m}^2/\text{d}$	250	$S < 5 \%$	0.05
$500 \leq T \leq 1000 \text{ m}^2/\text{d}$	750	$5 \% \leq S \leq 10 \%$	0.075
$1000 \leq T \leq 3000 \text{ m}^2/\text{d}$	2000	$10 \% \leq S \leq 15 \%$	0.125
$3000 \leq T \leq 6000 \text{ m}^2/\text{d}$	4500	$S > 15 \%$	0.175
$T > 6000 \text{ m}^2/\text{d}$	6000	-	-

Tabla 20. Valores adoptados de transmisividad y coeficiente de almacenamiento

Finalmente, tras las adopciones realizadas y luego de modelar en AQUIVAL y SIMGES para el escenario actual en el que los bombeos son los considerados por el PHJ 15-21 y no se contemplan recargas artificiales, se obtuvieron los siguientes resultados para el componente subterráneo:

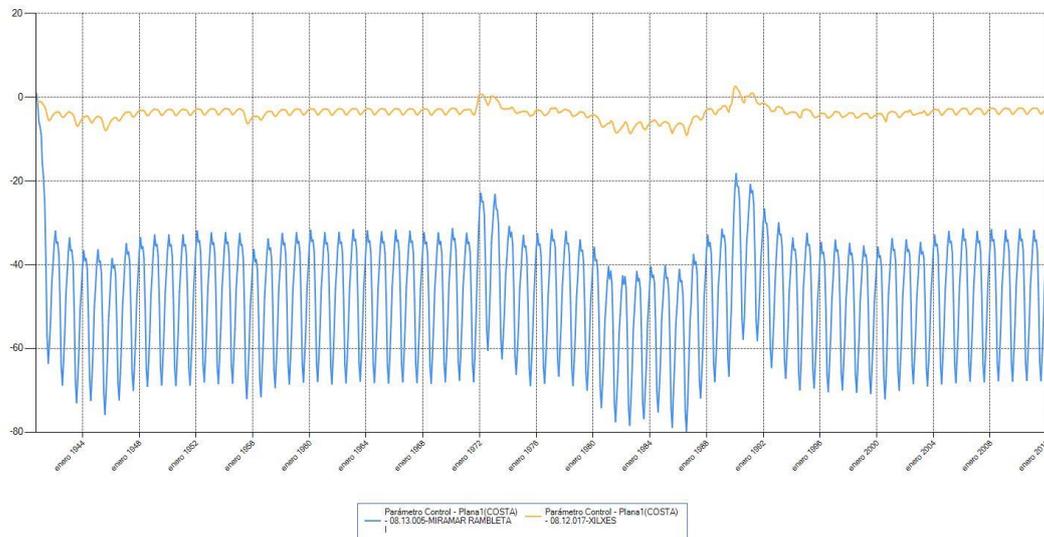


Figura 37. Resultados de calibración de modelo subterráneo - superficial en los dos puntos de control principales

Como se puede observar en la Figura 37, los niveles piezométricos promedio obtenidos en SIMGES corresponden en gran medida a los resultados observados, llegando en muchos casos a valores de -50 y en promedio a -40, según se observa, con lo que puede resolverse calibrado el modelo.

Una vez logrado esto con los dos puntos de control principales, realizaremos una comparación para el total de puntos de control. Esto se encuentra en el Anexo 2, en donde se compara el registro histórico obtenido de la Confederación Hidrográfica del Júcar[16] y los valores modelados de todos los puntos de control.

En la comparación se pudo apreciar que los 5 puntos de control más cercanos a la zona de interés (la Vall d'Uixó) se corresponden en gran medida con los valores modelados teniendo en cuenta que el orden de magnitud de los valores piezométricos en el acuífero de la Plana de Castellón varían desde -75 hasta 75 msnm aproximadamente, acorde al Mapa Piezométrico de España para el año 2008 [24].

El parámetro de control que presenta mayor discordancia es el 08.12.015 Mijares, el más lejano a la zona de interés, ubicado en las cercanías del río Mijares, en la cuenca intermedia. Los valores históricos están en el orden de magnitud de 40 msnm y los modelados en el orden de los 70 msnm, esta variación puede estar sujeta a la variable z altitud que no es considerada en el modelo AQUIVAL para la modelación distribuida. De todas formas, esta variación es subestimada dado que se encuentra lejos a la zona de estudio.

Con estas comparaciones se puede concluir que el modelo subterráneo se da por calibrado con un grado de aproximación bueno.

6.3. COMPONENTE SUPERFICIAL

La simulación de la componente superficial del modelo se basa en la configuración topológica mostrada en el apartado 6.1.

Esta componente no puede ser realmente validada si es que no se cuenta antes con el modelo subterráneo validado, como se ha detallado en el apartado 6.2. Una vez teniendo el modelo subterráneo validado, se procede a simular el componente superficial y se comparan los valores de datos históricos del embalse

Sichar, Arenós y la suma de ambos, los cuáles han sido descargados del Anuario de Aforos del Centro de Estudios Hidrográficos “La Casa del Agua” [25].

Con los resultados ya obtenidos, se procede a realizar la calibración de estos resultados se procede a compararlos con los volúmenes históricos registrados, obteniéndose la Figura 38 para el embalse Sichar, la Figura 39 para el embalse Arenós y la Figura 40 para la suma de ambos:

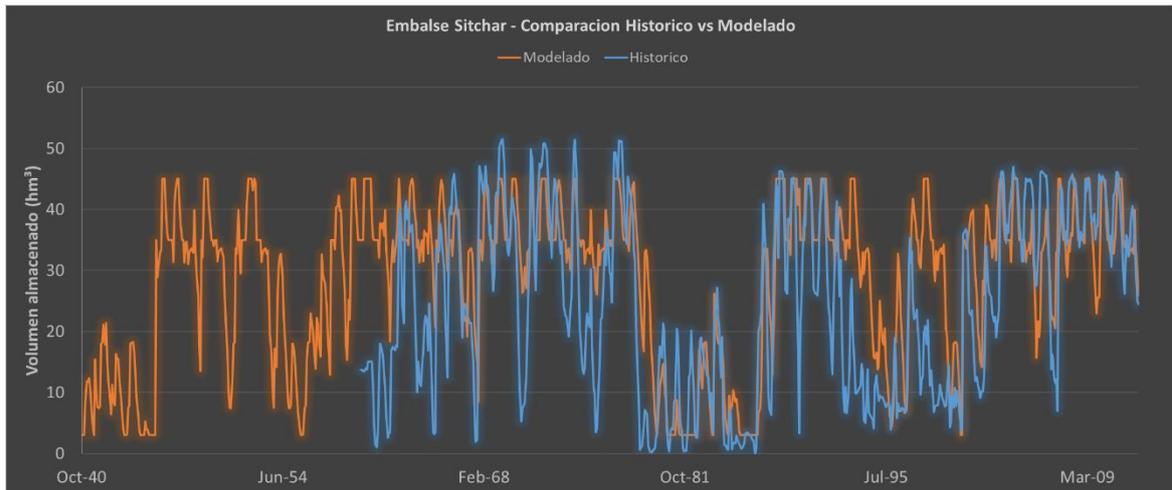


Figura 38. Resultados y comparación de escenario actual (registros históricos) - Embalse Sitchar.

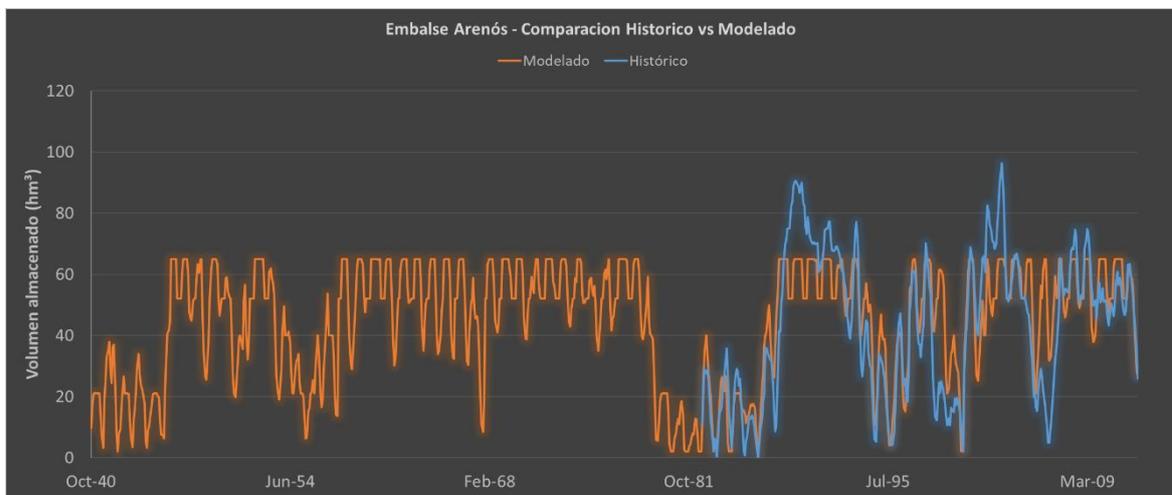


Figura 39. Resultados y comparación de escenario actual (registros históricos) - Embalse Arenós.



Figura 40. Resultados y comparación de escenario actual (registros históricos) - Embalse Schar + Arenós.

Como se puede observar, el modelo ha representado adecuadamente los volúmenes embalsados del embalse Schar, de Arenós y la suma de ambos, por lo que se puede concluir que el modelo está calibrado en la componente superficial y en la componente subterránea.

Por otro lado, una manera adicional de comprobar que el modelo híbrido superficial-subterráneo está representando bien la situación actual es comprobar las garantías de las Unidades de Demanda Agraria. Lamentablemente, la única información proporcionada sobre la situación actual de las garantías de las demandas, es la que se encuentra en el actual Plan Hidrológico del Júcar 15-21 [5] en el que se muestran las garantías de la UDA Riegos Tradicionales y que se compara en la Figura 41 a continuación:

Volumen (% DA)	R. Tradicionales		
	1 año	2 años	10 años
Máximo déficit según PHJ 15-21	23.8	37.4	55.6
Máximo déficit según modelo	21.4	31.44	40.72
	Cumple	Cumple	Cumple

Figura 41. Comparación de garantías modeladas en la UDA Riegos Tradicionales

Con esta comparación se termina de comprobar que la situación actual modelada se aproxima en gran medida a la real, tanto en los niveles piezométricos del acuífero, en los volúmenes embalsados y en las garantías del sistema, por lo que el modelo híbrido representa adecuadamente la situación actual.



7. GENERACIÓN DE ESCENARIOS

7.1. CONSIDERACIONES INICIALES

Para la generación de escenarios se tendrá en cuenta antes que nada el objetivo del trabajo que está reflejado en el título “análisis de excedentes” y para ello cabrá comentar un poco el génesis de esta solución.

El problema del mal estado cuantitativo y cualitativo de la masa de agua subterránea de la Plana de Castellón es un problema que ha sido abordado a través de décadas. En este tiempo se han manejado muchas soluciones, entre las más importantes:

- La reutilización de agua regenerada de la EDAR Castelló de la Plana.
- Recarga artificial de acuífero a través de la regulación en la Balsa Belcaire.
- Análisis de excedentes del río Mijares para cubrir demandas en la zona de la Vall d’Uixó.

Las tres medidas han sido propuestas en el Anexo 10. Plan de Medidas del PHJ 15-21 [5], con tipología 7. “Otras medidas, Medidas ligadas a impactos” y a continuación se procede a comentar sobre ellas:

La reutilización del agua de la EDAR Castelló de la Plana, medida 08M0498, según el último documento de seguimiento de medidas [26] de la CHJ no ha sido iniciada, puesto que se prevé que su inicio y fin se dé en 2022 y 2024, correspondientemente. Además, el TFM de Castro [27] indicaba que hay serios limitantes para el uso no solo por su lejanía sino por las medidas de adaptación que habría que tenerse en cuenta para implementar un sistema de reutilización. Además de ello, aunque el plan PDSEAR [28] impulsa este tipo de obras, la última directiva de reutilización de aguas de la unión europea [29] genera una gran incertidumbre en cuanto al verdadero incentivo de estas medidas, puesto que limita obtener indicadores económicos positivos al ser mucho más exigente que sus predecesoras. Por lo tanto, se considera que esta alternativa tiene un grado muy alto de incertidumbre para ser considerada.

La recarga artificial de acuífero con la Balsa Belcaire es la medida 08M1297 y en el informe del Plan de Seguimiento del 2018 [30] apareció por vez primera como una obra finalizada. Sin embargo, actualmente es una obra sumamente cuestionada, principalmente en los medios periodísticos de la zona del Castellón, puesto que es una obra que hasta la actualidad sigue sin real utilización, por falta de medidas de gestión. En el año 2018 ACUAMED seguía realizando pruebas de cargas y los agricultores de la zona reclamaban que al menos sea utilizada el agua embalsada para demandas agrícolas, principalmente de cítricos. Uno de los motivos por el que no es utilizada es debido a que para recargar un acuífero se debe tener establecido un plan de recarga de manera óptima, documento con el cual aún no se cuenta ni se ha estudiado. Además, ha habido reclamaciones, aunque se han limitado en gran medida el presupuesto para tal obra, imposibilitando nuevamente su puesta en marcha. Sin embargo, considerando que es una obra ya finalizada a diferencia de la EDAR Castellón de la Plana, se considerará la recarga al acuífero de la Plana de Castellón, con una zona de recarga especificada en las celdas de infiltración de la UDA de la Vall d’Uixó, donde se registra mayor abatimiento del nivel freático.

Finalmente, la tercera medida sobre la utilización de los excedentes del río Mijares es la medida 08M0443, y al igual que la primera medida aún no se cuentan con registros de su avance debido a que es una medida que ha de empezar en el año 2022 al 2024. Sin embargo, esta alternativa sí será considerada puesto que resulta ser una de las alternativas más viables actualmente para abordar la sobreexplotación del acuífero en la zona de la Vall d’Uixó.



7.2. GENERACIÓN DE ESCENARIOS

Este TFM aborda principalmente el estudio de la alternativa 08M0443, la cual plantea, según el Anexo 10 del actual plan de cuenca, la derivación de excedentes del río Mijares al Interfluvio Palancia-Mijares, sustituyendo las extracciones subterráneas en los regadíos de la Vall d'Uixó por recursos adicionales procedentes del río Mijares a través de la extensión del canal Cota 100, según se entiende de la Figura 42, extraída de dicho documento. Cabe resaltar que la Balsa de Belcaire es considerada como elemento de regulación de este caudal.



Figura 42. Extensión de canal cota 100 propuesto en el PHJ-15-21

Dicho esto, los escenarios tienen que estar ligados fundamentalmente a encontrar los limitantes que podría tener la aplicación de esta solución. Entre ellos, más que limitantes, consideraciones para tener en cuenta se han encontrado las siguientes:

7.2.1. Nuevo volumen de embalse Arenós

El embalse de Arenós con capacidad para almacenar 136.9 hm^3 actualmente es limitado a regular un máximo de 65 hm^3 por problemas de deslizamientos desde mediados de la década de los 80. En el 2019 se dio a conocer que, por un lado, el ejecutivo archivó de manera definitiva los proyectos que procuraban solventar los problemas de estabilidad de laderas, pero a su vez, aprobó la puesta en licitación de un proyecto que permite que el embalse regule un volumen de 100 hm^3 a través de la construcción de un aliviadero.



Figura 43. Titular de noticia sobre Arenós. Fuente: elperiodicomediterraneo.com

Esta nueva capacidad de regulación brinda a esta investigación la posibilidad de explorar (y explotar) nuevos escenarios de simulación en los que se analicen la posibilidad de aprovechar los recursos excedentarios del sistema.

7.2.2. Presiones ambientales

Las nuevas presiones ambientales son consideradas como los nuevos caudales ecológicos implantados por la CHJ en el Plan Hidrológico 15-21, en el cual se establecen nuevos caudales ecológicos para toda la confederación y en particular en el caso del Sistema de Explotación Mijares-Plana de Castellón, de las masas de agua superficial del sistema se ha fijado caudal ecológico en 27:

- El eje principal del río Mijares.
- El río Villahermosa.
- El tramo medio de la Rambla La Viuda.
- El río Veo.
- En algunos tramos en la cabecera.

Estos caudales son reflejados en el Anexo 6 del PHJ (en el Anexo 5 se puede visualizar de manera más detallada), y se ven reflejados en la Figura 44.

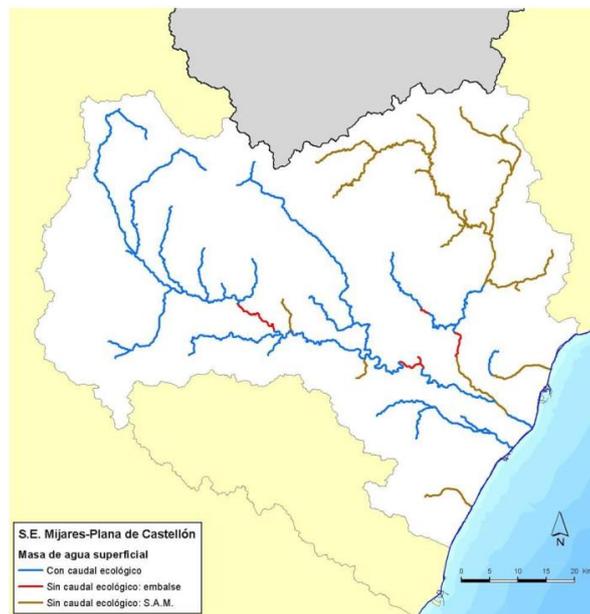


Figura 44. Localización de las masas de agua con caudales ecológicos en el sistema de explotación Mijares-Plana de Castellón. Fuente: PHJ 15-21

Naturalmente, el análisis objeto de este TFM que es derivar recurso hídrico del río Mijares a la zona de la Vall d'Uixó, esto implica garantizar no solo que los regantes del convenio de 1970 y aguas abajo no se vean afectados, sino que los nuevos caudales ecológicos sean respetados, por este motivo se han elegido las masas de agua más representativas para ser incluidas en el modelo como un escenario, y estas masas de agua se visualizan en la Tabla 21:

Código	Masa de agua	Caudal (m³/s)	
10.06	Río Mijares: E. Arenós – Az. Huertacha	0.40	
10.10	Río Mijares: E. Schar – Canal Cota 100	E. Schar – toma tramo común	1.10
		Toma tramo común – canal cota 100	0.95



10.11	Río Mijares: Canal cota 100 – Rbla. de la Viuda	0.20
10.13	Delta del Mijares	0.10

Tabla 21. Tramos de río considerados para caudal ecológico

Para la elección de estas masas de agua se ha tenido en cuenta en primer lugar el listado proporcionado en el Anexo 6 del PHJ -15-21 que, dado que es más corto que el mostrado en el Anexo 5 del mismo plan, se entiende que son los tramos más importantes.

Luego, se procedió a analizar los tramos de competencia del estudio, entendiéndose esto como los tramos que están siendo modelados en SIMGES, es decir Río Mijares (desde el embalse Arenós), Río Villahermosa y Rambla la Viuda (desde la presa María Cristina). Una vez habiendo discretizado los tramos de masas de agua circunscritos a los mencionados, se analizaron cuáles son los que tienen caudal ecológico registrado y finalmente se eligió por criterio de relevancia: aguas abajo de embalse, aguas arriba y debajo de canal cota 100 (porque en este punto se derivará) y finalmente en el delta del Mijares (zona ambientalmente importante), con lo cual una imagen que refleja muy bien este análisis se puede visualizar en la Figura 45, en donde el recuadro negro es el área modelada, las líneas negras son los canales principales del sistemas y las líneas a colores son los tramos con caudales ecológicos considerados.

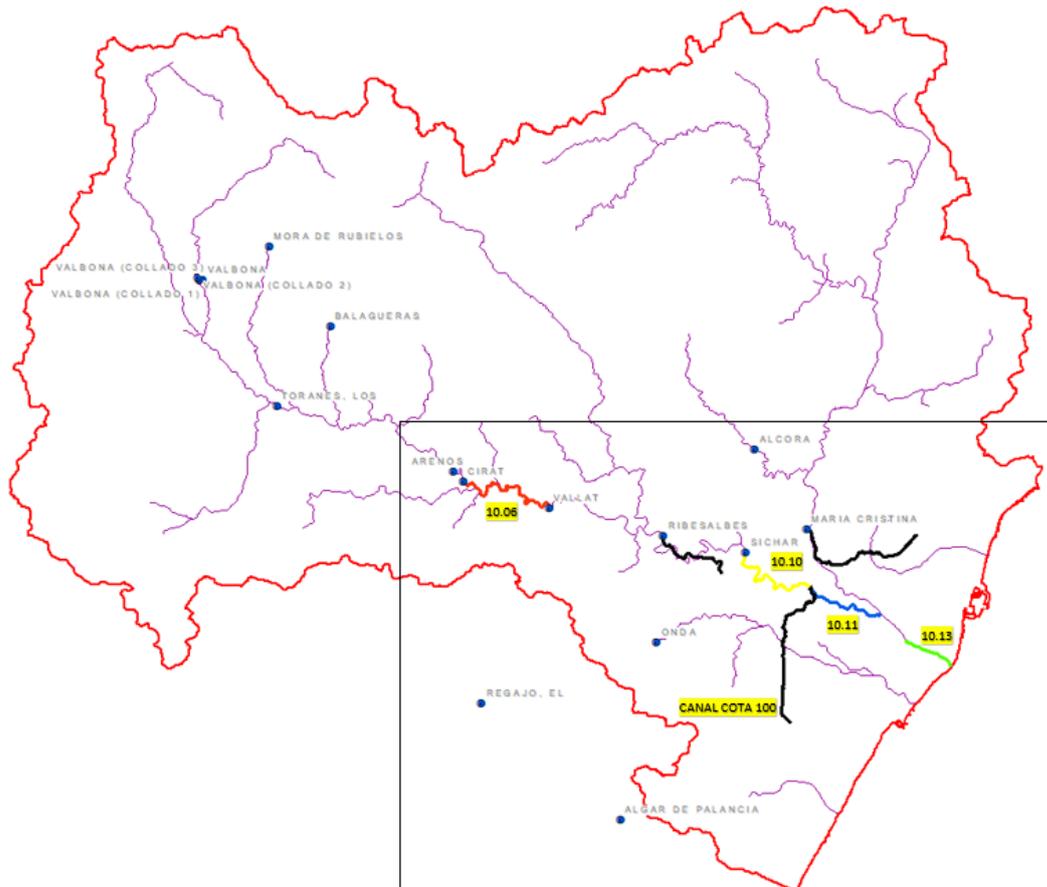


Figura 45. Caudales ecológicos considerados en el modelo

Cabe resaltar que la mensualización del caudal descrito en la tabla se realiza a través del factor de variación mensual (también llamado factor de modulación), acorde a la región hidroclimática que se encuentra el sistema, el cuál es Hidroregión 1 Mijares Cenia y los factores se pueden apreciar en la Tabla 22.

Factores de modulación unificados													
	Hidroregión	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep
1	Mijares - Cenia	1	1	1	1	1	1	1.2	1.2	1	1	1	1

Tabla 22. Factores de modulación para caudales mínimos en el sistema de explotación

7.2.3. Curvas de operación y suministro alternativo a Moncofa

Una de las consideraciones más importantes en la generación de escenarios es las propuestas de curvas de operación con las cuáles se determinará en qué medida y en qué condiciones se puede derivar agua de la cuenca del Río Mijares al Interfluvio. Entre las distintas curvas que se propongan, se considerarán también dos variantes:

- Curva de operación que contemple suministro invernal: Debido a que entre las conclusiones del PHJ 15-21 se indica que es considerada una alternativa factible la derivación de excedentes “invernales” del río Mijares, sin afectar las garantías de los Riegos Tradicionales y los Riegos Mixtos.
- Curva de operación que contemple suministro anual: Esto debido a que, dentro de las pruebas realizadas, no se prevé que haya limitante alguna para suministrar en época no invernal recurso hídrico a la zona de la Vall d’Uixó. Asimismo, se analizará si esto realmente afecte o no las garantías de los riegos tradicionales aguas abajo.

Finalmente, asociado al hecho que se dispondrá de un mayor volumen de agua derivado por los excedentes, se analizará también la posibilidad de reemplazar suministro subterráneo por superficial en la zona de la UDA Moncofa, a través de su conexión con la Balsa.

7.2.4. Definición de escenarios

Finalmente, comentadas las anteriores consideraciones, los escenarios a analizar para evaluar la factibilidad de la derivación de recursos excedentarios se resume en los mostrados en la Tabla 23.

Escenario	Nombre	Motivo
0	Original (Escenario Base Actual)	Evaluar estado actual
1	Escenario [0] + Nueva capacidad de Arenós + Nuevos Caudales Ecológicos	Por plan de cuenca
2	Escenario [1] + Excedentes con regla de operación curva intermedia	Análisis de alternativa
3A	Escenario [2] con curva optimizada 1	Análisis de alternativa
3A-Anual	Escenario [3A] con suministro de excedentes todo el año	Análisis de alternativa
3A-Anual+M	Escenario [3A-Anual] con suministro Balsa-Moncofa activado	Análisis de alternativa
3B	Escenario [2] con curva optimizada 2	Análisis de alternativa



3B-Anual	Escenario [3B] con suministro de excedentes todo el año	Análisis de alternativa
3C-Anual	Escenario [2] con curva optimizada 3 y con suministro de excedentes todo el año	Análisis de alternativa
Ad	Escenario [2] sin curva de excedentes con suministro de excedentes todo el año y con suministro Balsa-Moncofa activado	Prueba sin curva

Tabla 23. Escenarios definitivos para analizar en el modelo

8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de esta investigación se comentarán a partir del resumen de resultados presentados en la Tabla 24, Tabla 25 y Tabla 26. Asimismo, las gráficas de resultados de cada escenario simulado y sus principales características se pueden visualizar a detalle en el Anexo 3.



Balance en Zona del Mijares											
Elemento	Volumen Anual (hm³/a)	Escenario 0	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3A	Escenario 3A- Anual	Escenario 3A- Anual+M	Escenario 3B	Escenario 3B- Anual	Escenario 3C- Anual	Escenario Ad
Aportaciones	Cabecera Mijares	139.077	139.077	139.077	139.077	139.077	139.077	139.077	139.077	139.077	139.077
	Intermedia Mijares	54.445	54.445	54.445	54.445	54.445	54.445	54.445	54.445	54.445	54.445
	María Cristina	34.463	34.463	34.463	34.463	34.463	34.463	34.463	34.463	34.463	34.463
Otros recursos	Reutilización Castellón	13.838	13.838	13.838	13.838	13.838	13.838	13.838	13.838	13.838	13.838
	IDAM Oropeza	4.320	4.320	4.320	4.320	4.320	4.320	4.320	4.320	4.320	4.320
	IDAM Moncofar	3.750	3.750	3.750	3.750	3.750	3.750	3.750	3.750	3.750	3.750
Suministros	Cota 220	4.660	4.715	4.678	4.673	4.636	4.575	4.660	4.613	4.562	4.419
	Cota 100	22.254	22.516	22.337	22.316	22.135	21.845	22.252	22.028	21.782	21.100
	María Cristina	12.115	12.199	12.106	12.100	12.019	11.885	12.079	11.981	11.887	11.613
	Tradicional	63.233	63.148	63.134	63.124	63.084	63.084	63.115	63.081	62.972	62.341
	Urbanos	39.175	39.175	39.175	39.175	39.175	39.175	39.175	39.175	39.175	39.175
Recarga subterránea	Sitchar	26.923	27.236	27.020	27.003	26.784	26.424	26.985	26.736	26.651	26.100
	María Cristina	16.207	16.188	16.187	16.187	16.197	16.179	16.187	16.197	16.197	16.179
	Río Mijares	26.501	27.836	27.409	27.407	27.014	26.586	27.405	27.012	26.996	26.525
Sobrantes	Mijares	50.413	47.554	44.860	44.840	43.006	39.911	44.824	42.987	42.904	39.698
	EDAR Castellón	13.090	13.090	13.090	13.090	13.090	13.090	13.090	13.090	13.090	13.090
	EDAR Vall d'Uixo	0.808	0.808	0.808	0.808	0.808	0.808	0.808	0.808	0.808	0.808
	Manantial San Jose	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

Tabla 24. Resumen del balance promedio de elementos principales en la zona del Mijares – Todos los escenarios



Balance en Zona de La Vall d'Uixó											
Elemento	Volumen Anual (hm ³ /a)	Escenario 0	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3A	Escenario 3A- Anual	Escenario 3A- Anual+M	Escenario 3B	Escenario 3B- Anual	Escenario 3C- Anual	Escenario Ad
Río Belcaire	Escorrentía	0.533	0.533	0.533	0.533	0.533	0.533	0.533	0.533	0.533	0.533
	Salida mar	0.161	0.161	0.190	0.190	0.199	0.195	0.191	0.199	0.201	0.198
	Aporte a balsa	0.372	0.372	0.343	0.343	0.334	0.338	0.342	0.334	0.332	0.335
UDA Vall d'Uixo	Sum. Manantial	1.147	1.147	1.147	1.147	1.147	1.147	1.147	1.147	1.147	1.147
	Sum. Bombeo	10.592	10.592	6.886	6.801	4.065	4.268	6.659	3.811	3.112	2.845
	Sum. Reutilizacion EDAR Uixo	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250	1.250
	Sum. Balsa	-	-	3.706	3.791	6.527	6.324	3.933	6.781	7.480	7.747
UDA Moncofa	Sum. bombeo	6.370	6.370	6.370	6.370	6.370	1.484	6.370	6.370	6.370	0.322
	Sum. Balsa	-	-	-	-	-	4.886	-	-	-	6.048
Balsa	Entrada río	0.372	0.372	0.343	0.343	0.334	0.338	0.342	0.334	0.332	0.335
	Entrada canal C.100	-	-	3.763	3.849	6.767	11.340	3.995	7.018	7.724	13.939
	Salida recarga artificial	0.344	0.344	0.400	0.401	0.557	0.467	0.404	0.555	0.560	0.480
	Salida riegos	-	-	3.706	3.791	6.527	11.210	3.933	6.781	7.480	13.794

Tabla 25. Resumen del balance promedio de elementos principales en la zona de La Vall d'Uixó – Todos los escenarios



Resumen de resultados: Garantías e intrusión											
Elemento	Característica	Escenario 0	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3.A	Escenario 3.A- Anual	Escenario 3.A- Anual+M	Escenario 3.B	Escenario 3.B- Anual	Escenario 3.C- Anual	AD
Valle de Uixó	Max.Def.A.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Max.Def.2A.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Max.Def.10A.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sum. Superficial (hm³/mes)	18%	18%	47%	48%	69%	67%	49%	71%	76%	78%
	Sum. Subterráneo (hm³/mes)	82%	82%	53%	52%	31%	33%	51%	29%	24%	22%
Riegos Tradicionales	Max.Def.A.	21.4	25.23	25.23	25.23	25.23	25.23	25.23	25.23	25.23	31.84
	Max.Def.2A.	31.44	38.96	38.96	38.96	38.96	38.96	38.96	38.96	38.96	54.83
	Max.Def.10A.	40.72	55.38	55.71	55.76	55.77	55.63	56.08	56.04	64.68	103.46
	Sum. Superficial (hm³/mes)	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	99%	98%
	Sum. Subterráneo (hm³/mes)	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
Canal Cota 220	Max.Def.A.	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	Max.Def.2A.	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
	Max.Def.10A.	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
	Sum. Superficial (hm³/mes)	25%	26%	26%	26%	25%	25%	25%	25%	25%	24%
	Sum. Subterráneo (hm³/mes)	75%	74%	74%	74%	75%	75%	75%	75%	75%	76%
Canal Cota 100	Max.Def.A.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Max.Def.2A.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Max.Def.10A.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Sum. Superficial (hm³/mes)	58%	58%	58%	58%	57%	57%	58%	57%	56%	55%
	Sum. Subterráneo (hm³/mes)	42%	42%	42%	42%	43%	43%	42%	43%	44%	45%
Acuífero	Nivel P. Mínimo (msnm)	-47.20	-47.05	-27.88	-27.44	-13.22	-12.77	-26.72	-11.95	-8.40	-5.39
	Nivel P. Mínimo (msnm) - Últimos 2 años -	-46.13	-46.07	-20.93	-20.93	-1.63	0.37	-20.93	-1.63	-1.64	0.34
	Intrusión (hm³/mes)	-0.03342	-0.03251	-0.01552	-0.01517	-0.00241	0.01044	-0.01461	-0.00144	0.00139	0.01795
	Intrusión (hm³/mes) - Últimos 2 años -	-0.02708	-0.02650	-0.00273	-0.00272	0.01520	0.03250	-0.00273	0.01517	0.01513	0.03228
	Volumen Total (hm³/mes)	977.57	994.39	994.43	994.12	992.74	982.51	993.25	991.10	987.79	970.00
Caudales Ecológicos en masas de agua superficial (Garantía)	10.06: Salida de Arenós	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	10.10 - A: Salida de Sitchar	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	10.10 - B: Después de toma T.C.	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	10.11: Antes de Rbla. La Viuda	-	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
	10.13: Delta del Mijares	-	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Suministro de canal de excedentes (hm³/año)		0	0	3.76	3.85	6.77	11.34	4	7.02	7.72	13.94

Tabla 26. Resumen de garantías y análisis de intrusión salina – Todos los escenarios



Si se observan directamente los resultados de las tablas mostradas previamente, se pueden realizar las siguientes apreciaciones:

De la Tabla 24, sistema Mijares:

- El suministro a los riegos mixtos y tradicionales varía realmente muy poco en todos los escenarios, puesto que la mayor variación se dio en el escenario Ad donde con respecto al escenario base el suministro a riegos tradicionales varía en 1 hm³/mes. Esto comprueba que realmente se están utilizando los volúmenes excedentarios del sistema.
- A partir del escenario 1 en adelante, todos los valores de recarga subterránea del río Mijares son mayores al escenario base, previsiblemente por la imposición de caudales ecológicos lo que exige un caudal mayor y constante al río que permite la recarga.
- En todos los escenarios de tipo “Anual” en el que se utiliza un mayor volumen del sistema y, por lo tanto, los niveles de los embalses son menores, muestran que la recarga subterránea del embalse Sicha es menor, aunque esta diferencia no sea significativa ni vulnere el estado del acuífero.
- La disminución de sobrantes del sistema Mijares es una muestra más evidente del empleo de los volúmenes excedentarios, en la que se puede apreciar en escenarios extremos una reducción desde un valor de 50 hm³/mes en el escenario base hasta 3 hm³/mes.

De la Tabla 25, sistema La Vall' d'Uixó:

- Se puede visualizar a partir del escenario 2 en el que se activa el volumen trasegado a la Balsa Belcaire, que las salidas hacia el mar del Río Belcaire aumentan ya que la Balsa puede tener un volumen extra y no exige al sistema extraer agua del río Belcaire.
- En la UDA La Vall' d'Uixó se tienen uno de los resultados más interesantes, en el que se pone de manifiesto la disminución del volumen bombeado del acuífero, en escenarios extremos, desde un valor de 10.6 hm³/mes en el escenario 0 a 2.8 hm³/mes en el escenario Ad.
- En los escenarios en donde se incluye el abastecimiento alternativo a la UDA Moncofa (3A-Anual+M y Ad), zona que también es abastecida de manera subterránea por el acuífero, se puede visualizar también una disminución importante de los volúmenes bombeados del acuífero, pasando desde un valor de 6.4 hm³/mes en el escenario base a 1.5 hm³/mes en el escenario 3A-Anual+M.
- Es evidente que el escenario Ad tiene un efecto muy importante en cuanto a disminución de volúmenes bombeados se refiere en las UDAs de Moncofa y La Vall' d'Uixó. Esto debido a que este escenario de prueba no se le asignó una regla de operación a los volúmenes derivados, es decir el volumen hacia el sistema de La Vall' d'Uixó era bastante más importante, como se puede apreciar en el elemento Balsa, llegaba a derivar un volumen promedio de casi 14 hm³/mes frente a los 6 a 7 en escenario de tipo Anual y 11 en el único otro escenario en el que se incluye Moncofa (3A-Anual+M).
- Otro aspecto importante son los volúmenes de recarga artificial, en el que destacan los escenarios de tipo anual nuevamente con valores mayores de recarga artificial, pero también se observa que



en los escenarios en los que se incluye a Moncofa, aunque previamente se ha comentado que estos tienen una importante influencia en el reemplazo de volúmenes de bombeo, también se observa que en estos escenarios se tiene una menor recarga artificial, lógicamente porque los volúmenes de la Balsa están siendo utilizados por una nueva demanda (Moncofa) y al no llegar a su capacidad máxima (2 hm³), se activan en menor cantidad de veces la recarga artificial.

De la Tabla 26:

- Las afectaciones a las garantías de las UDAs en todos los escenarios son nulas con excepción de la UDA que está aguas abajo del punto de toma, que es la de los Riegos Tradicionales. Sin embargo, los cambios anuales, bianuales y decanales están dentro de lo tolerable, con excepción del escenario Ad, que prescindía de una regla de operación para los volúmenes trasegados, poniendo en evidencia su necesidad.
- En el escenario base, la UDA La Vall' d'Uixó tenía un abastecimiento subterráneo de 82 %. Con la sola inclusión de una derivación en época invernal de los volúmenes excedentarios esta cifra se reduce a 50% (en ese orden). Sin embargo, el cambio más importante se demuestra en los escenarios de tipo "Anual" (volumen derivado todos los meses del año), en los que esta cifra se reduce entre 25-30 %. Es decir, se puede lograr una reducción de aproximadamente 50 % de suministros por bombeo en esta UDA. Esto mismo sucede en la Tabla 25 en donde Moncofa reduce aproximadamente un 75% de sus bombeos.
- No se aprecian variaciones significativas en los suministros superficiales y subterráneos de los riegos mixtos. En escenarios extremos, la UDA Cota 100 disminuyó en 3 % su suministro superficial y aumentó en 3 % su suministro subterráneo, algo vinculado directamente a la derivación del caudal de un sistema a otro. De todas maneras, este valor no representa una modificación importante.
- Otro de los resultados más importantes se encuentra en el elemento acuífero, en donde se puede visualizar una recuperación de hasta aproximadamente 40 m. en los niveles piezométricos mínimos promedio de toda la serie y hasta 45 m. si se consideran los niveles promedio de los dos últimos años (que es a lo que se esperaba llegar). Nuevamente, los escenarios de tipo "Anual" (derivación de volúmenes todos los meses) son los que representan una recuperación de niveles más notoria. En contraste con otras variables, en este caso la inclusión de abastecimiento a la UDA Moncofa no tiene mayor implicancia al estar alejada de la zona de niveles piezométricos mínimos (zona de La Vall' d'Uixó). Esto se puede apreciar en la

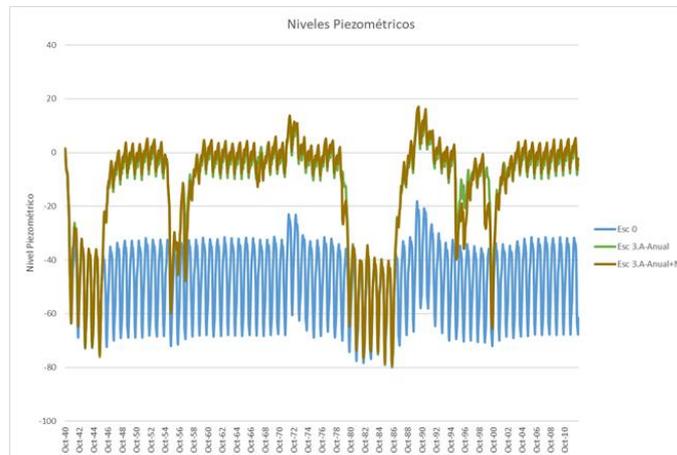


Figura 46. Comparación de niveles piezométricos mínimos entre escenario 0, 3A-Anual y 3A-Anual+M

- También se observan variaciones importantes en el caudal litoral de intercambio en la zona crítica, puesto que los escenarios de tipo Anual demuestran, según un promedio de los dos últimos años, que se pueden alcanzar valores positivos, es decir evitar en gran medida la intrusión salina. En contraste con el anterior comentario, los escenarios que incluyen a Moncofa y el reemplazo de sus bombes subterráneos sí tienen una gran influencia en esta variable, logrando mejoras notorias en un 40 % sobre los escenarios de tipo Anual que no consideran a la UDA Moncofa. Esto está asociado obviamente a la ubicación de esta UDA.

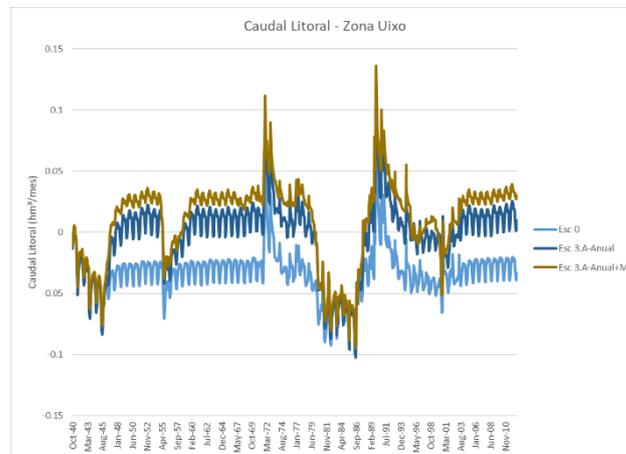


Figura 47. Comparación de caudales litorales-Zona Vall d'Uixó/Moncofa entre escenario 0, 3A-Anual y 3A-Anual+M

- Los volúmenes trasegados tienen una importante variación en todos los escenarios. Se puede determinar que los volúmenes trasegados en todo el año aumentan en un 45 a 50 % aproximadamente a los escenarios con derivación solo invernal y los que consideran suministro a Moncofa aumentan los volúmenes trasegados en un 75 % aproximadamente a los escenarios con suministro invernal y 25 % a los escenarios de tipo suministro anual.
- No menos importante, tanto en el escenario base como en los escenarios sintéticos con los nuevos caudales ecológicos (y teniendo en cuenta las simplificaciones del modelo) se pueden lograr garantías en todos los casos de 100%.

8.1. VOLUMEN APORTADO DESDE EL SISTEMA MIJARES AL INTERFLUVIO Y EL EFECTO EN EL ACUÍFERO DE LA PLANA DE CASTELLÓN

- Si se analizan las entradas a la Balsa Belcaire (volumen aportado por el sistema Mijares) y la recuperación de los niveles piezométricos, tomando en cuenta un promedio de los niveles que se llegan en los dos últimos años modelados se desprende, como se aprecia en la Figura 48, que el volumen de transferencia entre sistemas tiene una lógica correspondencia con la recuperación de niveles. Los volúmenes trasegados varían entre 4 y 11.5 hm³ (con excepción del escenario de prueba Ad) y estos pueden suponer una recuperación de entre 15 a 40 metros (sobre el nivel actual de -50 msnm como nivel mínimo).

Se evidencia que en los escenarios en donde se consideró una asignación anual del volumen (no solo época invernal) existe una mayor recuperación de niveles (escenarios "Anual").

Por otro lado, se puede apreciar que, en el caso de la recuperación de niveles piezométricos, el aumento de un volumen de derivación de aproximadamente 5 hm³/mes al incluir a la UDA Moncofa, no supone una recuperación significativa de niveles y esto se entiende porque la UDA Moncofa se encuentra en el litoral del área de estudio, mientras que los niveles mínimos registrados se encuentran en la zona más continental.

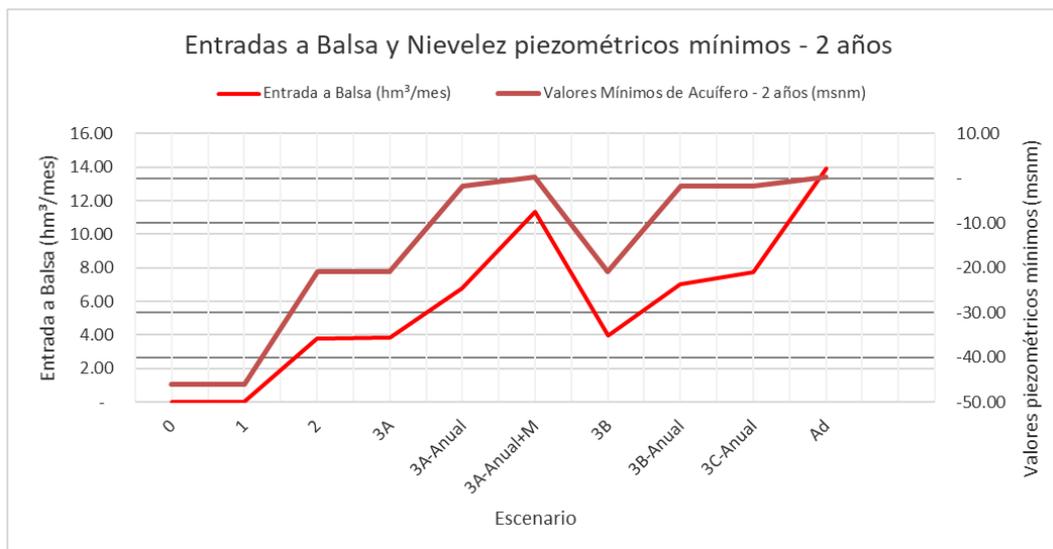


Figura 48. Análisis cruzado de las entradas a la Balsa Belcaire y los valores piezométricos mínimos del acuífero en todos los escenarios

- Es importante realizar el análisis de calidad no solo de cantidad de la masa de agua subterránea, para lo cual se realiza la gráfica de la Figura 49, representando el volumen trasegado a la Balsa Belcaire y la evolución de los caudales de intercambio en la zona litoral crítica (intrusión salina, si son negativos).

De esta gráfica se desprende una interesante correspondencia que indican que los volúmenes trasegados y los caudales de intercambio son directamente proporcionales, con una ligera variación de proporcionalidad en el escenario Ad sin regla de operación. Por otro lado, con esta

gráfica se demuestra una vez que uno de los escenarios con mayor impacto positivo en el interfluvio en términos de recuperación de niveles piezométricos e intrusión salina, es el escenario 3A-Anual+M.

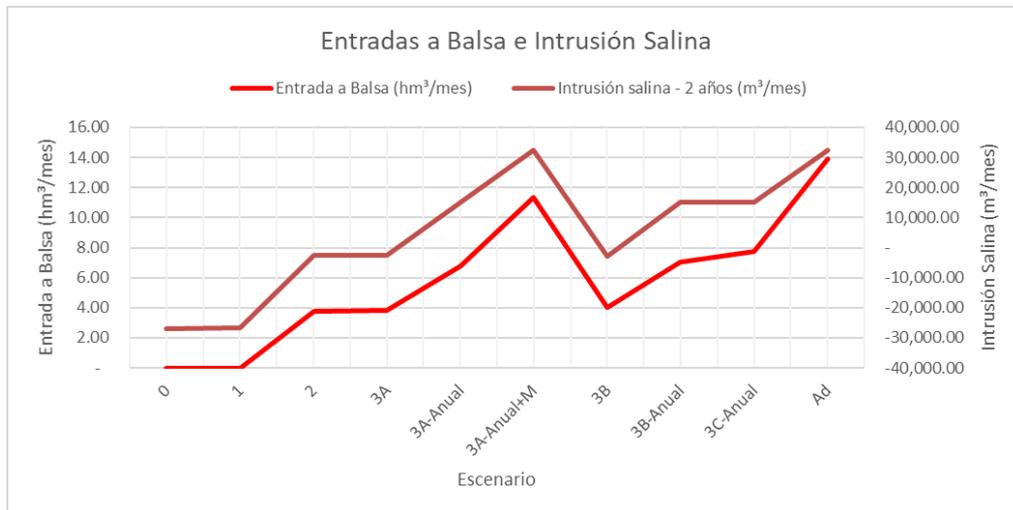


Figura 49. Análisis cruzado de las entradas a la Balsa Belcaire y los valores de caudales de intercambio litoral en todos los escenarios

8.2. EFECTO SOBRE LAS GARANTÍAS EN LAS DEMANDAS DEL MIJARES

- Una parte neurálgica de esta investigación es comprender en qué medida podía trasegarse volumen hídrico de un sistema a otro (interfluvio) sin afectar de manera considerable principalmente a los regantes aguas abajo del punto de derivación, es decir a la UDA Riegos Tradicionales. De la Figura 50 se desprende que hay suficiente recurso hídrico en el sistema Mijares como para que los volúmenes excedentarios puedan ser aprovechados sin afectar las garantías de la UDA Riegos Tradicionales, con excepción del escenario AD.

La utilidad de este último escenario, en el que no se disponía de una regla de operación para la derivación es precisamente demostrar que se necesita gestionar de manera adecuada el recurso hídrico y la explotación de los excedentes a través del uso de reglas de operación. De otra manera, como se observa, las garantías son vulneradas considerablemente al punto de no cumplir los criterios 25/50/75 de UTAH para demanda agrarias.

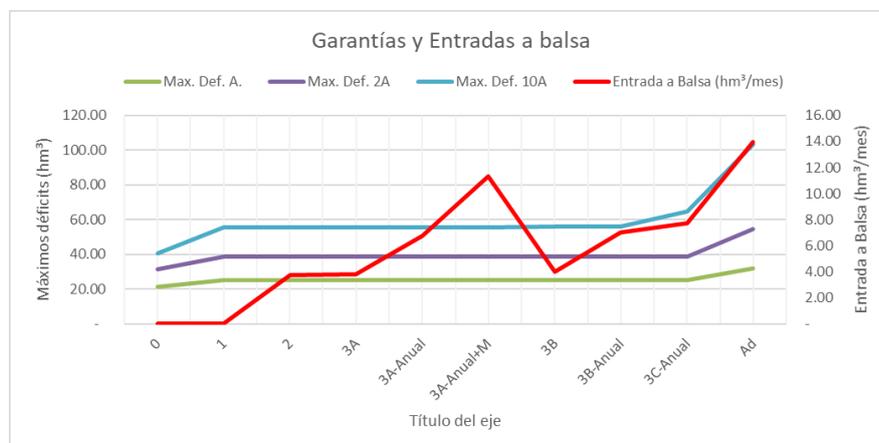


Figura 50. Análisis cruzado de las garantías de la UDA Riegos Tradicionales y las entradas a la Balsa Belcaire en todos los escenarios

- La Figura 51, en la que se grafica los volúmenes de suministro a riegos mixtos (UDA Canal Cota 100, UDA Canal Cota 220 y UDA Pantanos de María Cristina) y en el eje secundario los volúmenes que ingresan a la Balsa Belcaire, es decir, los volúmenes extraídos del sistema Mijares; de esta gráfica se desprende que el empleo de los caudales excedentarios del sistema Mijares pueden proveer un volumen promedio de 6 a 8 hm³/mes al sistema de la Vall d'Uixó, con un costo de aproximadamente 1 hm³/mes de reducción de suministros a los riegos mixtos (sin contar escenario AD), en donde evidencia el buen aprovechamiento del recurso hídrico entre sistemas distintos.

Así, teniendo en cuenta que los volúmenes suministrados por el sistema Mijares a los riegos mixtos promedian oscilan entre 38 y 39 hm³ aproximadamente, un volumen de 12 hm³ que se suministran a la Balsa resulta una cantidad importante (cerca del 30%) aunque, por ser excedentarios, estos no supongan una detracción directa del suministro a los riegos mixtos.

Es importante resaltar que los volúmenes que entran a la Balsa Belcaire son utilizados para reemplazar bombes subterráneos en la UDA Moncofa en dos escenarios, por lo que es un volumen que es trasegado para ser aprovechado al interfluvio.

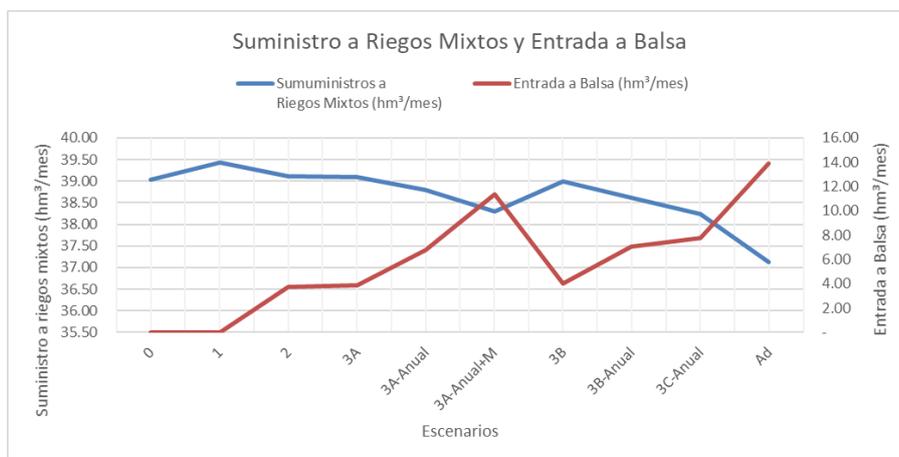


Figura 51. Análisis cruzado de los suministros a riegos mixtos y las entradas a la Balsa Belcaire en todos los escenarios

8.3. OTRAS CONSIDERACIONES

- Aunque la vulneración de las garantías de la UDA Riegos Tradicionales en el escenario Ad demuestra la importancia de tener una regla de operación para la derivación de los volúmenes excedentarios, surge la pregunta del por qué en los tres escenarios Anuales con 3 reglas de operación distintas no se han percibido cambios muy importantes.

La Figura 52 dilucida un poco este punto, en el que se han graficado todas las reglas de operación y se han extraído los volúmenes promedios mensuales de cada embalse, se han sumado y se han graficado.

Lo que se observa es que en la mayoría de los meses (ya que lo que muestra la gráfica son solo promedios) los volúmenes embalsados están por encima de los volúmenes de restricción. Esto clarifica ciertamente el hecho de que las reglas de operación, aunque útiles, no tengan una influencia preponderante en los escenarios, puesto que hay suficiente recurso hídrico de manera que, con reglas más restrictivas o menos restrictivas, las activaciones de derivación en el modelo serán similares.

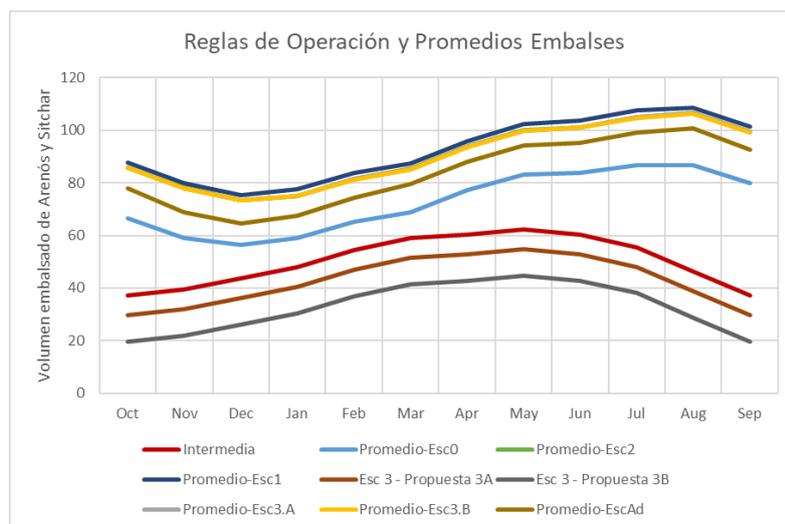


Figura 52. Reglas de operación analizadas y volúmenes promedios mensuales de la suma de embalses Arenós y Sitchar

- El aprovechamiento de los excedentes del sistema Mijares, naturalmente representarán una disminución indirecta en las salidas superficiales del sistema, como se aprecia en la Figura 53; esto tiene un impacto directo de recuperación de niveles piezométricos mínimos promedio de los dos últimos años en el Acuífero de la Plana de Castellón, de entre 30 a 50 metros (frente a un escenario en el que se sobreexplota el acuífero), teniendo en 4 escenarios una recuperación de niveles mínimos cercanos a los 0 msnm. La particularidad de estos 4 escenarios que demuestran una importante recuperación de los niveles piezométricos del acuífero es que los 4 han contemplado un suministro anual de volumen de recurso a la Balsa Belcaire, no solo en épocas invernales como se indicaba en las conclusiones del PHJ 15-21.

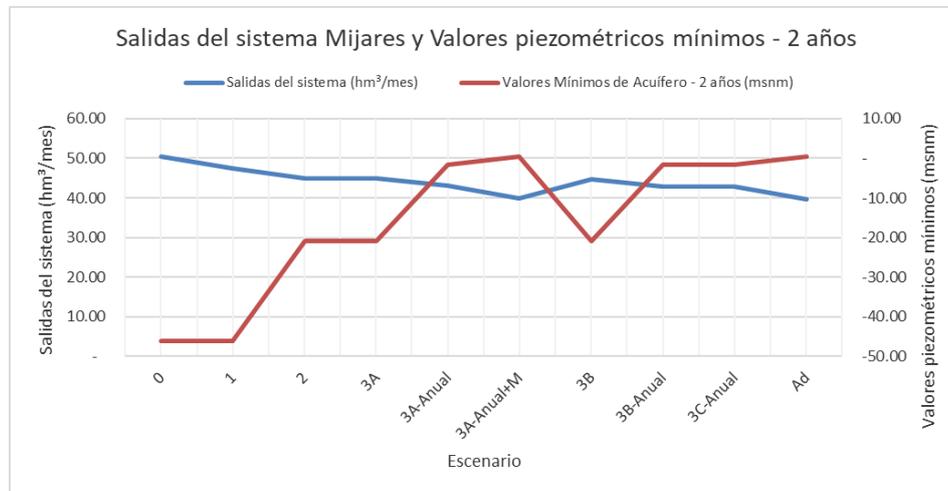


Figura 53. Análisis cruzado de la salida del sistema Mijares y los valores piezométricos mínimos del acuífero en todos los escenarios



9. CONCLUSIONES

- El aprovechamiento de los volúmenes excedentarios del Sistema Mijares hacia el Interfluvio Palancia-Mijares para la mejora del estado cuantitativo y cualitativo de la masa de agua subterránea la Plana de Castellón es factible bajo distintos escenarios
- Pese a que el PHJ 15-21 recomendó trasegar caudales solo en época invernal, se ha demostrado que la derivación de caudales todos los meses del año tiene un impacto positivo mucho más importante que si solo se derivara en época invernal, sin significar esto una vulneración considerable en otras demandas agrarias.
- Bajo todos los escenarios analizados se ha comprobado que los caudales ecológicos considerados en el PHJ 15-21, aun bajo escenarios más conservadores, son respetados y cumplen con una garantía al 100%.
- Con los distintos escenarios analizados, se ha demostrado que los suministros subterráneos en la zona de la Vall d'Uixó que en condición actual llegaban a ser del 82 % (y suministro superficial 18%), pueden ser llevados a valores de 22 % de suministro subterráneo y 88 % de suministro superficial, en los escenarios más optimistas.
- Lógicamente queda evidenciada una interesante correspondencia directamente proporcional entre los volúmenes derivados a la Balsa Belcaire y la reducción de la intrusión salina. Además de ello, también se observó que esta correspondencia decrece cuando el volumen derivado aumenta considerablemente, como en el escenario Ad que, para un volumen trasegado mucho mayor, los volúmenes de descarga al mar no aumentan significativamente (con la misma proporcionalidad que en otros escenarios). Estos volúmenes de descarga al mar fueron analizados en la zona litoral crítica (correspondiente a Moncofa).
- Se ha demostrado que reduciendo las salidas de volumen de recurso hídrico en el sistema Mijares se pueden recuperar entre 30 a 50 metros en los niveles piezométricos mínimos, lo cual es un valor sumamente importante. Aun así, cabe resaltar que estos valores son basados en un parámetro de control ubicado en el punto de mínimo registro piezométrico del acuífero, que es el piezómetro 08.13.005 Miramar-Rambleta-I.
- Los escenarios que contemplan el aprovechamiento de los volúmenes almacenados en la Balsa Belcaire para reemplazar bombeos no solo de la zona de la Vall d'Uixó sino también de la UDA Moncofa, muestran los mejores indicadores de recuperación de niveles piezométricos del acuífero y de calidad de aguas considerando que invierte la intrusión salina actual en la zona litoral de Moncofa.
- Se ha demostrado asimismo que las reglas de operación no tienen una influencia significativa en la derivación de volúmenes debido a que hay suficiente recurso hídrico para que, aunque estas sean más restrictivas o menos restrictivas, se active la derivación en similar número de veces en cada uno de ellos.
- Naturalmente, con esta investigación queda también demostrada la utilidad de la modelación híbrida superficial y subterránea a través de los modelos AQUIVAL y SIMGES del software AQUATOOL.



10. RECOMENDACIONES

- Es necesario involucrar un análisis de coste y amortización de la inversión determinando también el coste por metro cúbico de agua enviada al interfluvio y establecer el modo de financiación, con distintos indicadores de rentabilidad, incluyendo otras alternativas como desalación y reutilización de aguas residuales a fin de que puedan complementar la actual medida, en el marco del Plan Nacional de Depuración, Saneamiento, Eficiencia, Ahorro y Reutilización (PDSEAR).
- Dado que una de las principales conclusiones del estudio es que existe suficiente recurso hídrico para ser aprovechado, sería interesante realizar un estudio bajo distintos escenarios de cambio climático y reducción del recurso hídrico en esta zona mediterránea. Existen ya estudios que indican que en esta zona la incertidumbre en cuanto a los recursos hídricos varía considerablemente en distintos escenarios de cambio climático de distintas fuentes, se sugiere en este caso realizado un Análisis de Decisiones Informadas del Riesgo Climático (CRIDA, por sus siglas en inglés) de tipo bottom-up, para analizar de manera más confiable qué medida y acciones se han de tomar a futuro para mitigar los efectos adversos en esta zona.
- En esta investigación se ha comprobado la vigencia de los estudios realizados por ITGE sobre la caracterización del acuífero de la Plana en términos de transmisividad y coeficiente de almacenamiento, por lo que, a falta de investigaciones detalladas de campo, se recomienda mantener estos valores que en el presente estudio han sido validados.
- En distintos congresos internacionales sobre la gestión de recarga de acuíferos inducida (ISMAR, por sus siglas en inglés) se han recomendado distintos tipos de empleo de recarga de acuíferos que permitan utilizar estos como embalses subterráneos, puesto que por un lado el cambio climático lo que hará es intensificar los eventos climatológicos extremos, por lo que son necesarias estructuras de regulación, sin embargo existe una creciente tendencia al decommissioning de las presas y evitar construcción de embalses de regulación. Ante esto, será importante realizar estudios sobre la gestión de recarga de acuíferos subterráneos para que estos hagan a la vez de embalses y, con las adecuadas reglas de explotación, puedan suministrar recurso de forma sostenible a las poblaciones en épocas de sequía.



1. REFERENCIAS

- [1] T. F. Stocker *et al.*, *Climate change 2013 the physical science basis: Working Group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. 2013.
- [2] SPANCOLD, "Las Presas y los Objetivos de Desarrollo Sostenible," 2017.
- [3] Confederación Hidrográfica del Júcar, *Esquema Provisional de Temas Importantes de la Demarcación Hidrográfica del Júcar*. 2020, p. 505.
- [4] B. López Geta, Juan Antonio; Senet Alonso, Melchor; Ballesteros Navarro, "Serie. MANUALES DE UTILIZACIÓN DE ACUÍFEROS. PLANAS DE CASTELLÓN Y SAGUNTO 1989," 1989. [Online]. Available: http://aguas.igme.es/igme/publica/libros1_HR/libro67/lib67.htm.
- [5] Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ), *Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar 2015-2021*. 2015, p. 896.
- [6] A. Sahuquillo, "Papel de los acuíferos en la regulación de los recursos hidráulicos," in *Las Aguas Subterráneas. Importancia y perspectivas*, 1993.
- [7] A. Sahuquillo, E. Cassiraga, A. Solera, and J. M. Murillo, *Modelos de uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas*. 2010.
- [8] www.cope.es, "El río Mijares pierde el caudal ecológico después de 4 meses," 2019. [Online]. Available: https://www.cope.es/emisoras/comunidad-valenciana/castellon-provincia/castellon/noticias/rio-mijares-pierde-caudal-ecologico-despues-meses-20191012_518401.
- [9] J. Quereda Sala, E. Montón Chiva, B. Mollá Cantavella, and M. V. Quereda Vázquez, "Evaluación de los recursos hídricos en el sistema hidrográfico Mijares-La Plana. efectos bajo un escenario de cambio climático," *Boletín la Asoc. Geógrafos Españoles*, 2016.
- [10] U. de C. Centro de Cambio Global, "Guía Metodológica-Modelación Hidrológica y de Recursos Hídricos con el Modelo WEAP," *Univ. Catol. Chile*, 2009.
- [11] M. Bruhn and F. Miralles-Wilhelm, "Base de Datos de Hidrología Analítica para América Latina y el Caribe," 2014.
- [12] CDM Smith, "Simplified Water Allocation Model (SWAM)," 2014.
- [13] G. E. Diaz and T. C. Brown, "AQUARIUS: a modeling system for river basin water allocation," *Gen. Tech. Rep. - US Dep. Agric. For. Serv.*, 1997.
- [14] J. Andreu Alvarez, "Aplicación del método de los autovalores al análisis de sistemas con uso conjunto de recursos hidráulicos superficiales y subterráneos," 1984.
- [15] M. A. Perez Martin, J. A. Álvarez, and T. E. Monreal, "Modelo Distribuido de Simulación Del Ciclo Hidrológico Y Calidad Del Agua, Integrado en Sistemas de Información Geográfica, Para Grandes Cuencas (PATRICAL).," *PhD Tesis. Univ. Politècnica Val.*, 2005.
- [16] Confederación Hidrográfica del Júcar, "Red piezométrica de la Confederación Hidrográfica del Júcar," 2021. [Online]. Available: <https://aps.chj.es/siajucar/?f=70&c=423&c=172&c=421&o=2&f=71&o=2&c=591&c=595&c=596>.
- [17] M. Varela, "La Plana de Castellón. Modelo Subterráneo," in *Utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas*, 1983.
- [18] L. Blanco Albentosa, "Revisión y Documentación de un Modelo de Simulación de Acuíferos por el Método de los Autovalores," 2000.
- [19] Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ), "Esquema de Temas Importantes (ETI) del Plan Hidrológico del Júcar 2022-2027." 2020.



- [20] Instituto Geológico y Minero de España (IGME), “Visor InfolGME.” [Online]. Available: <http://info.igme.es/visorweb/>.
- [21] Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE), “Las Aguas Subterráneas de España.” 1993.
- [22] E. Giménez Forcada, “Caracterización Hidrogeoquímica de los Procesos de Salinización en el Acuífero Detrítico Costero de la Plana de Castellón (España),” 2008.
- [23] Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE) and EPTISA, “Serie. Manuales de Utilización de Acuíferos. Plana de Castellón y Sagunto 1989.” 1990.
- [24] Instituto Geológico y Minero de España (IGME), *Las aguas subterráneas en la planificación hidrológica*. 2012.
- [25] Centro de Estudios Hidrográficos (CEH), “Anuario de Aforos,” *CEDEX*, 2016. [Online]. Available: https://ceh.cedex.es/anuarioaforos/afo/embalse-datos.asp?ref_ceh=8021.
- [26] Ministerio para la Transición Ecológica, “Seguimiento del Plan Hidrológico del Júcar - Año 2019,” 2019.
- [27] B. C. Quiles, “Estudio de la reutilización integrada de las aguas regeneradas en el tramo final del río Mijares,” Universidad Politécnica de Valencia, 2017.
- [28] Ministerio para la Transición Ecológica, “Plan Nacional de Depuración, Saneamiento, Eficiencia, Ahorro y Reutilización,” 2018.
- [29] Parlamento Europeo, *Reglamento (UE) 2020/741 del Parlamento Europeo y del Consejo de 25 de Mayo de 2020 relativo a los requisitos mínimos para la reutilización del agua*. 2020.
- [30] Ministerio para la Transición Ecológica, “Seguimiento del Plan Hidrológico del Júcar - Año 2018,” 2020.