



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



ETS INGENIEROS DE CAMINOS,
CANALES Y PUERTOS

TRABAJO DE FIN DE MASTER

Modelo matemático del flujo de agua subterránea de los
acuíferos de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara (Valencia)

Presentado por

Pérez Membrives, Miguel Ángel

Para la obtención del

Master en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Curso: 2018/2019

Fecha: Septiembre de 2019

Tutor: Cassiraga, Eduardo



Resumen del Trabajo Fin de Máster

Resumen en español

En la Comunidad Valenciana, región en la que predomina un clima mediterráneo y seco y en la que las lluvias se presentan de manera muy escasa, el agua subterránea juega un papel muy importante, pues cerca del 50% del agua que se consume proviene de acuíferos, supliendo así la falta de agua superficial para el uso humano.

En los últimos años la explotación de los recursos subterráneos ha aumentado considerablemente, suponiendo un gran impacto para los acuíferos y afectando negativamente en sus niveles piezométricos, como es el caso de la masa de agua subterránea Requena-Utiel, en la que sus alturas piezométricas han disminuido notablemente debido a los pozos de extracción que se han ido introduciendo a lo largo de las últimas décadas.

Tal es el caso, que en el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar del ciclo 2015-2021 se declaró que la masa de agua subterránea Requena-Utiel se encuentra en mal estado cuantitativo. Por ello, se ha decidido elaborar un modelo matemático que sirva de soporte para conseguir que la masa vuelva a alcanzar un buen estado cuantitativo, estudiando junto a ésta la masa de agua subterránea Cabrillas-Malacara.

Las masas de agua subterránea Requena-Utiel (080-133) y Cabrillas-Malacara (080-139) están situadas en la zona central de la Demarcación Hidrográfica del Júcar. La primera cuenta con una superficie total de 987,90 km², de los cuales 966,40 km² están ubicados en la provincia de Valencia y el restante 21,50 km² en la provincia de Cuenca. Del total de superficie de la masa de agua, 982,15 km² están considerados como permeables siendo la permeabilidad de la masa de agua de carácter medio mayoritariamente y, en algunas zonas, se presenta una permeabilidad alta. Por otro lado, la segunda masa de agua subterránea, Cabrillas-Malacara, es colindante en su noroeste con la masa de Requena-Utiel y tiene una superficie de 286,34 km².

Sobre ambas masas de agua subterránea discurre el río Magro, que está considerado por el IGME como ganador, aunque el estudio realizado por Martínez Gil (2018) determina que la mayor parte de éste ha pasado a ser perdedor. Los únicos datos de caudales que se disponen del río Magro son una estación de aforos en el municipio de Requena y las entradas al embalse de Forata, situado en el río Magro aguas abajo



de la región. De ellos se observa que, en los últimos años, el caudal del río ha disminuido en gran medida, influenciado en gran parte por la disminución de niveles piezométricos en la masa de agua subterránea de Requena.

Para la construcción del modelo se utilizará el software MODFLOW-2005, apoyado en la interfaz gráfica ModelMuse. MODFLOW simula el flujo de agua subterránea en medio poroso resolviendo las ecuaciones que rigen el problema mediante diferencias finitas.

El modelo se calibrará manualmente intentando reproducir los valores observados en los pozos de observación existentes en la zona y, una vez calibrado, se analizarán los resultados obtenidos.

Resumen en valenciano

A la Comunitat Valenciana, regió en la qual predomina un clima mediterrani i sec i en la qual les pluges es presente de manera mol escassa, l'aigua subterrània juga un paper molt important, perquè prop del 50% de l'aigua que es consumeix prové d'aqüífers, suplint així la falta d'aigua superficial per a l'us humà.

En els últims anys l'explotació dels recursos subterranis ha augmentat considerablement, suposant un gran impacte per als aqüífers i afectant negativament en els seus nivells piezomètrics, com és el cas de la massa d'aigua subterrània Requena-Utiel, en la qual les seues altures piezomètriques han disminuït notablement a causa dels pous d'extracció que s'han anat introduint al llarg de les últimes dècades.

Tal és el cas, que en el Pla Hidrològic de la Demarcació Hidrogràfica del Xúquer del cicle 2015-2021 es va declarar que la massa d'aigua subterrània Requena-Utiel es troba en mal estat quantitatiu. Per això, s'had decidit elaborar un model matemàtic que servisca de suport per a aconseguir que la massa torne a aconseguir un bon estat quantitatiu, estudiant al costat d'aquesta la massa d'aigua subterrània Cabrillas-Malacara.

Les masses d'aigua subterrània Requena-Utiel (080-133) i Cabrillas-Malacara (080-139) están situades en la zona central de la Demarcació Hidrogràfica del Xúquer. La primera compta amb una superfície total de 987,90 km², dels quals 966,40 km² están situats a la província de València i el restant 21,50 km² a la província de Conca. Del total de superfície de la massa d'aigua, 982,15 km² están considerats com a permeables sent la permeabilitat de la massa d'aigua de caràcter medie



majoritàriament i, en algunes zones, es presenta una permeabilitat alta. D'altra banda, la segona massa d'aigua subterrània, Cabrillas-Malacara, és confrontant en el seu nord-oest amb la massa de Requena-Utiel i té una superfície de 286,34 km².

Sobre totes dues masses d'aigua subterrània discorre el riu Magre, que està considerat pel IGME com a guanyador, encara que l'estudi realitzat per Martínez Gil (2018) determina que la major part d'aquest ha passat a ser perdedor. Les úniques dades de cabals que es disposen del riu Magre són una estació d'aforaments en el municipi de Requena i les entrades a l'embassament de Forata, situat en el riu Magre aigües avall de la regió. D'ells s'observa que, en els últims anys, el cabal del riu ha disminuït en gran manera, influenciat en gran part per la disminució de nivells piezomètrics en la massa d'aigua subterrània de Requena.

Per a la construcció del model s'utilitzarà el programari MODFLOW-2005, recolzat en la interfície gràfica ModelMuse. MODFLOW simula el flux d'aigua subterrània al mig porós resolent les equacions que regeixen el problema mitjançant diferències finites.

El model es calibrarà manualment intentant reproduir els valors observats en els pous d'observació existents en la zona i, una vegada calibrat, s'analitzaran els resultats obtinguts

Resumen en inglés

Comunidad Valenciana is a region in which a Mediterranean and dry climate predominates and in which it rains very little. Groundwater plays a very important role, since about 50% of the water consumed comes from aquifers, thus supplying the lack of surface water for human use.

In recent years, the exploitation of underground resources has increased considerably, assuming a great impact for aquifers and affecting negatively their piezometric levels. This is the case of the Requena-Utiel groundwater body, in which its piezometric heights have decreased significantly due to the extraction wells that have been introduced over the last decades.

Such is the case, that in the Hydrological Plan of the Júcar Hydrographic Demarcation of the 2015-2021 cycle, it was stated that the Requena-Utiel groundwater body is in a bad quantitative state. Therefore, it has been decided to develop a mathematical model that serves as a support to ensure that the mass returns to a good quantitative state, been studied with the groundwater mass Cabrillas-Malacara.



Requena-Utiel (080-133) and Cabrillas-Malacara (080-139) groundwater bodies are located in the central area of the Júcar Hydrographic Demarcation. The first has a total area of 987.90 km², of which 966.40 km² are located in the province of Valencia and the remaining 21.50 km² in the province of Cuenca. Of the total surface area of the water body, 982.15 km² are considered to be permeable, with the permeability of the water body being mostly medium-sized and, in some areas, high permeability. On the other hand, the second groundwater body, Cabrillas-Malacara, is adjacent in its northwest with the Requena-Utiel mass and has an area of 286.34 km².

Over both groundwater bodies, runs the Magro River, which is considered by the IGME as winner, although the study conducted by Martínez Gil (2018) determines that most of it has become a loser. The only flow data available from the Magro River are a gauging station in the municipality of Requena and the entrances to the Forata reservoir, located on the Magro river downstream of the region. From them it is observed that, in recent years, the river flow has greatly decreased, influenced in large part by the decrease in piezometric levels in the groundwater mass of Requena.

The MODFLOW-2005 software will be used to build the model, supported by the ModelMuse graphic interface. MODFLOW simulates the flow of groundwater in a porous medium solving the equations that govern the problem through finite differences.

The model will be manually calibrated trying to reproduce the values observed in the observation wells existing in the area and, once calibrated, the results obtained will be analyzed.

Palabras clave en español

Masa de agua subterránea, Requena-Utiel, Sobreexplotación, Flujo de agua subterránea, Modelo matemático

Palabras clave en valenciano

Massa d'aigua subterrània, Requena-Utiel, Sobreexplotació, Flux d'aigua subterrània, Model matemàtic

Palabras clave en inglés

Groundwater body, Requena-Utiel, Overexploitation, Groundwater flow, Mathematical model

Índice

1.- Introducción	1
1.1.- Justificación y objetivos.....	2
1.2.- Antecedentes	4
2.- Modelo conceptual	11
2.1.- Localización del área de estudio	11
2.2.- Modelo digital del terreno	12
2.3.- Contexto hidrológico	13
2.3.1.- Climatología	13
2.3.2.- Recursos hídricos superficiales	16
2.4.- Contexto hidrogeológico	21
2.4.1.- Límites del sistema	21
2.4.2.- Unidades hidrogeológicas.....	22
2.4.3.- Dominios hidrogeológicos	24
2.5.- Recarga	26
2.6.- Bombeos.....	28
2.7.- Modelo hidrogeológico conceptual	29
3.- Selección del código.....	35
3.1.- Código y modelo matemático	35
4.- Implementación del modelo.....	37
4.1.- Discretización espacio-temporal y diseño de la malla	37
4.1.1.- Diseño de la malla.....	37
4.1.2.- Discretización temporal.....	38
4.2.- Condiciones de contorno	38
4.2.1.- Límites laterales	39
4.2.2.- Cauces superficiales.....	42
4.2.3.- Recarga por infiltración	44
4.3.- Condición inicial.....	46
4.4.- Parámetros hidrogeológicos	47
4.5.- Bombeos.....	50
5.- Proceso de calibración y análisis de los resultados del modelo	53
5.1.- Ejecución del modelo y primeros resultados	55



5.1.1.- Análisis de los resultados de la primera ejecución del modelo	64
5.2.- Calibración del modelo.....	64
5.2.1.- Análisis de los resultados del modelo calibrado.	67
5.2.2.- Análisis de la bondad de ajuste del modelo	79
6.- Recomendaciones y prospectiva.....	85
7.- Conclusiones	87
8.- Bibliografía	89

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Comarca de Requena-Utiel.....	2
Ilustración 2. Criterio para determinar el buen o mal estado cuantitativo en base al balance hídrico.	4
Ilustración 3. Localización de las masas de agua de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara.....	11
Ilustración 4. Modelo digital del terreno.	12
Ilustración 5. Temperatura media anual.	14
Ilustración 6. Temperatura diaria en la estación de Requena.....	15
Ilustración 7. Precipitación media anual.	15
Ilustración 8. Precipitación media mensual entre 2001 y 2016.....	16
Ilustración 9. Red fluvial en las masas de agua subterránea Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara.....	17
Ilustración 10. Caudales registrados en la estación de aforos de Requena.	18
Ilustración 11. Caudales registrados en la estación de aforos de Requena entre los años 2004 y 2016.	18
Ilustración 12. Embalses más cercanos a las masas de agua subterránea RU-CM.	20
Ilustración 13. Datos de entradas, salidas y volumen embalsado en el embalse de Forata.	20
Ilustración 14. Límites del sistema.....	22
Ilustración 15. Modelo de las alturas de las diferentes unidades hidrogeológicas....	24
Ilustración 16. (1) Geología a partir de MAGNA. (2) Geología a partir del IGME. (3) Litología a partir del IGME	25
Ilustración 17. Dominios hidrogeológicos de las masas de agua subterránea Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara.....	26
Ilustración 18. Zonificación de la recarga en las dos masas de agua subterránea... ..	27
Ilustración 19. Evolución de la recarga anual en la zona de estudio.	28
Ilustración 20. Pozos contabilizados para satisfacer la demanda (1) agrícola, (2) urbana, (3) industrial.....	29
Ilustración 21. Cantidad de agua extraída en ambas masas de agua subterránea. .	29
Ilustración 22. Mapas piezométricos de los años 1970/1974, 2005 y 2008.....	32
Ilustración 23. Modelo conceptual.	33
Ilustración 24. Discretización horizontal del modelo.	37



Ilustración 25. Arriba, piezómetros próximos al límite con la masa Buñol-Cheste; abajo, los valores de esos piezómetros.	41
Ilustración 26. A la izquierda, piezómetros próximos al límite con la masa de Mira; a la derecha los valores de esos piezómetros.....	42
Ilustración 27. Valores de la altura piezométrica en el contorno a partir de los vértices.	42
Ilustración 28. Representación de los cauces superficiales tenidos en cuenta en el modelo.....	44
Ilustración 29. Zonificación basada en el modelo PATRICAL (Pérez-Martín, 2005). 45	
Ilustración 30. Zonificación de la recarga por retornos de riego.	46
Ilustración 31. Zonificación para los parámetros basada en el modelo de Fernández-Urazi, (2017).....	48
Ilustración 32. Representación de todos los pozos de bombeo en MODFLOW.	51
Ilustración 33. Esquema del procedimiento de la calibración manual.	54
Ilustración 34. Piezómetros utilizados para la calibración del modelo	55
Ilustración 35. Balance global del sistema a lo largo del tiempo en $\text{hm}^3/\text{año}$	58
Ilustración 36. Comparación de los valores de los piezómetros observados con los valores de altura piezométrica simulados en esos mismos puntos.	63
Ilustración 37. Altura inicial en el primer modelo y altura inicial en el proceso de calibración.	65
Ilustración 38. Conductancia de los cauces inicial y la asignada tras la calibración. 67	
Ilustración 39. Balance global del sistema a lo largo del tiempo tras la calibración, en $\text{hm}^3/\text{año}$	68
Ilustración 40. Balance hidrogeológico a lo largo del tiempo estudiado en el contorno con Mira ($\text{hm}^3/\text{año}$).	70
Ilustración 41. Balance hidrogeológico a lo largo del tiempo estudiado en el contorno con Buñol-Cheste ($\text{hm}^3/\text{año}$).....	71
Ilustración 42. Balance hidrogeológico a lo largo del tiempo estudiado en la rambla de la Torre ($\text{hm}^3/\text{año}$).....	71
Ilustración 43. Balance hidrogeológico a lo largo del tiempo estudiado en el río Madre ($\text{hm}^3/\text{año}$).	72
Ilustración 44. Balance hidrogeológico a lo largo del tiempo estudiado en el río Magro ($\text{hm}^3/\text{año}$).	73



Ilustración 45. Balance hidrogeológico a lo largo del tiempo estudiado en el río Buñol (hm ³ /año).....	74
Ilustración 46. Comparación entre valores simulados del modelo calibrado y valores observados en los piezómetros.	78
Ilustración 47. Análisis estadístico de los valores observados en comparación con los simulados.	80
Ilustración 48. Análisis estadístico de los valores observados en comparación con los simulados en cada pozo de observación.....	81
Ilustración 49. Número de ocurrencias entre los residuos.	82



Modelo matemático del flujo de agua subterránea de los
acuíferos de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara (Valencia)





Índice de tablas

Tabla 1. Número de pozos existentes en cada masa de agua subterránea clasificados según el tipo de demanda.	29
Tabla 2. Valores de los parámetros hidrogeológicos de cada una de las zonas, por capa.....	50
Tabla 3. Valores de los parámetros del algoritmo de resolución.	55
Tabla 4. Promedio anual del balance hidrogeológico en $\text{hm}^3/\text{año}$	58
Tabla 5. Promedio anual del balance hidrogeológico por zonas.	59
Tabla 6. Valores de los parámetros hidrogeológicos una vez calibrados.	66
Tabla 7. Promedio anual del balance hidrogeológico en $\text{hm}^3/\text{año}$, una vez calibrado el modelo.....	68
Tabla 8. Promedio anual del balance hidrogeológico por zonas en $\text{hm}^3/\text{año}$, una vez calibrado el modelo.	74
Tabla 9. Valores de referencia del Criterio de Nash-Sucliffe	83
Tabla 10. Valores obtenidos para cada indicador.....	83



Modelo matemático del flujo de agua subterránea de los
acuíferos de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara (Valencia)



1.- Introducción

En España la demanda total de agua sufre importantes diferencias tanto regionales como de uso. Desde el punto de vista cuantitativo, la demanda para riego agrícola supone un 80% del total, por un 14% del abastecimiento urbano y un 6% de la demanda para la industria. Gran parte de esta demanda se satisface gracias a los recursos superficiales, pero en las zonas en las que éstos no resultan suficientes, se recurre a la extracción de aguas subterráneas para suplir esta carencia.

En el caso concreto de la Comunidad Valenciana, en la que el clima se caracteriza mayoritariamente por ser el típico mediterráneo y seco, además de las escasas lluvias que se registran, el agua subterránea juega un papel muy importante, ya que alrededor del 50% del agua para abastecimiento y para regadío proviene del subsuelo.

El considerable aumento de la explotación de las aguas subterráneas en los últimos años en la Comunidad Valenciana ha supuesto un impacto importante para algunos acuíferos, afectando de manera notoria sus niveles piezométricos.

Este es el caso de la masa de agua subterránea Requena-Utiel, en la que sus niveles piezométricos se han visto reducidos a causa de los pozos de extracción que se han ido introduciendo en la región desde hace ya unas décadas.

Esta masa de agua se encuentra mayoritariamente en la comarca de Requena-Utiel, cuya capital es el municipio de Requena y que se encuentra situada al oeste de la provincia de Valencia. La comarca linda por su oeste con la comunidad de Castilla-La Mancha y se encuentra delimitada por las Sierras de Utiel y Juan Navarro al norte, la Sierra de Mira al noroeste, la Sierra del Tejo y Las Cabrillas al este, y al sur y oeste por el río Cabriel.

La comarca forma una meseta relativamente llana, con una inclinación desde el noroeste (con unos 900 m de altitud en Camporrobles) hacia el sureste (600 m de altitud en Campo Arcís). La altura media es de unos 750 m.

El clima se presenta como un clima mediterráneo continentalizado, propio de zonas interiores de la península ibérica. Las temperaturas son extremas, con inviernos fríos y veranos muy cálidos.

El motor económico de la región está ligado a la producción de vino, y es que desde que en 1910 surgiera en la localidad de Requena la enseñanza enológica a través de

la Estación de Viticultura y Enología, ésta ha sido la trayectoria económica a seguir en la comarca. Desde entonces, prácticamente toda su actividad económica se ha basado en el cultivo de la vid y la mejora en la producción de vinos. Requena, con una superficie de unas 18.000 ha, es uno de los municipios con mayor superficie de cultivos de viñedo y mayor producción vinícola y, junto con otros municipios como Utiel, Venta del Moro y Camporrobles (entre otros), conforman la Denominación de Origen Utiel-Requena, con más de un total de 40.000 ha dedicadas al monocultivo de la vid.

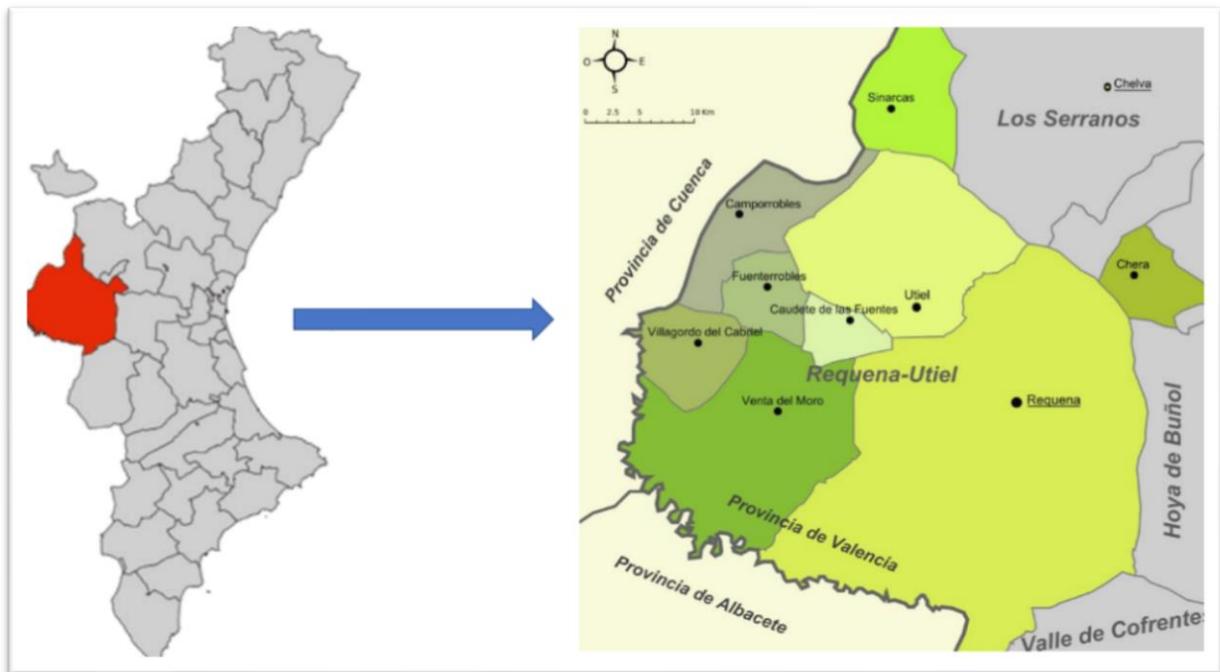


Ilustración 1. Comarca de Requena-Utiel.

Con el fin de conocer con mayor precisión el estado en el que se encuentra la masa subterránea de agua Requena-Utiel y cómo ha llegado hasta él, y así poder encontrar una solución a los posibles problemas que esta caída de niveles piezométricos pueda conllevar a los usuarios, se pretende (entre otras cosas) elaborar un modelo numérico que analice su comportamiento, así como las posibles relaciones río-acuífero y el efecto de los bombeos sobre ésta masa en los últimos años.

1.1.- Justificación y objetivos

Dado que la actividad principal de la zona es la agrícola, y todo el motor económico depende de ésta, se hace indispensable la utilización de grandes volúmenes de agua



para el cultivo de la vid. Como el recurso hídrico superficial resulta muy limitado, la solución ha sido la extracción de agua desde los acuíferos.

El flujo de agua subterránea supone un elemento fundamental en el ciclo hidrológico del agua, estando completamente relacionado con los demás componentes de éste. En regiones áridas, este flujo puede suponer el caudal base de un río, de manera que éste no se seque. Hoy en día es un recurso que nutre de agua tanto el abastecimiento urbano, como el agrícola.

En el Plan Hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar del ciclo 2015-2021, la masa de agua subterránea Requena-Utiel ha sido declarada en mal estado cuantitativo en base a los criterios para que los que una masa de agua subterránea esté en buen estado cuantitativo:

- La tasa media de la captación no es superior al recurso disponible.
- No hay afección a las aguas superficiales que impida alcanzar los objetivos ambientales.
- No se produce daño a los ecosistemas terrestres dependientes de las aguas subterráneas.
- No existe intrusión marina.

Para verificar el cumplimiento de estos criterios, se aplica una metodología específica para cada uno de ellos. En el caso de la masa de agua subterránea Requena-Utiel, no se supera el test de balance hídrico (Ilustración 2), el cual evalúa la extracción existente frente al recurso disponible, así como el impacto que produce dichas extracciones, identificando las masas de agua subterráneas donde las extracciones son intensas y superiores al recurso disponible.

Con el fin de conseguir que vuelva a un buen estado cuantitativo y dar una solución a los usuarios de esta masa, se pretende (entre otras cosas) elaborar un modelo numérico que analice su comportamiento, así como las posibles relaciones río-acuífero y el efecto de los bombeos y reservas asignadas en los últimos años.

Para tener un mejor conocimiento de la zona de estudio que ayude a entender el estado en el que se encuentra la masa de agua subterránea Requena-Utiel, se ha decidido que ésta se estudiará en conjunto con la masa de agua subterránea Cabrillas-

Malacara (080-139), situada contiguamente en su extremo sureste, tratándose como una única masa de agua subterránea.



Ilustración 2. Criterio para determinar el buen o mal estado cuantitativo en base al balance hídrico.

En vista a todo lo comentado anteriormente, se propone:

- Establecer el propósito del modelo, en base a los requerimientos planteados en el documento del Plan de Explotación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel (CHJ, 2016).
- Elaborar un modelo conceptual del funcionamiento del sistema, teniendo en cuenta toda la información y los antecedentes disponibles.
- Diseñar, construir y calibrar el modelo utilizando el código MODFLOW (McDonald, M. y Harbaugh, A., 1984) y la interfaz gráfica de usuario ModelMuse (Winston, R.B., 2009).

1.2.- Antecedentes

Para conocer el estado de las diferentes masas de agua y la evolución que se ha ido desarrollando en ellas con el tiempo, se han desarrollado una serie de documentos o estudios. Estos han supuesto un gran avance para el conocimiento de las masas de agua subterránea en España en general y la masa de agua subterránea Requena-Utiel en concreto, y en los cuales se basa este trabajo.

A continuación se enumerarán los más relevantes, realizándose una pequeña reseña de los que han influido o influyen de manera directa en la planificación y gestión de la masa de agua subterránea Requena-Utiel o en la realización de este modelo.

Planes hidrológicos

Los planes hidrológicos de cuenca son documentos elaborados por los organismos de la misma, en los que se plasman las directrices a seguir en los próximos años para la gestión del agua en cada demarcación hidrográfica. También establecen el marco normativo a través del cual se alcanzan los objetivos medioambientales y se conocen los recursos hídricos disponibles.

Los planes hidrológicos de la Cuenca del Júcar hasta la fecha son los siguientes:

- CHJ (Confederación Hidrográfica del Júcar), 1998. Plan hidrológico de la Cuenca del Júcar. Real Decreto 1664/1998, de 24 de julio.
- CHJ (Confederación Hidrográfica del Júcar), 2014. Plan hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar del ciclo 2009-2015. Real Decreto 595/2014, de 11 de julio.
- CHJ (Confederación Hidrográfica del Júcar), 2016. Plan hidrológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar del ciclo 2015-2021. Real Decreto 1/2016, de 8 de enero.

En este último plan hidrológico se declaró en mal estado cuantitativo la masa de agua subterránea Requena-Utiel.

En su artículo 20.C)9., en referencia esta masa de agua, se establece lo siguiente:

“Se reservan 6,5 hm³/año de recursos subterráneos de la masa de agua subterránea de Requena-Utiel para atender futuros crecimientos en la unidad de demanda urbana de Subterráneos de Requena y de la industria de la zona, así como para la adecuación de concesiones de regadío y redotaciones en la comarca Requena-Utiel. Esa reserva podrá materializarse una vez se realice un plan de explotación de la masa de agua subterránea”.

En el plan hidrológico del ciclo anterior, el de 2009-2015, se establecía para el cultivo de la vid en la zona de denominación de origen Requena-Utiel una dotación bruta de apoyo de 450 m³/ha/año. Desde la aprobación del plan en 2014, los usuarios de la zona han manifestado que tal dotación no era suficiente para el riego de la vid, sobre todo en años secos.

Por ello, en el plano del ciclo 2015-2021, considerando estas exigencias, se ha aumentado dicha dotación a 1.250 m³/ha/año. Además, debido a que la masa de agua

se encuentra en mal estado cuantitativo, se han limitado las concesiones de recursos subterráneos a casos muy concretos.

Planes específicos de explotación

Las metas fundamentales de los planes de explotación son garantizar el aprovechamiento de los recursos hídricos, impidiendo su deterioro por agentes contaminantes y aportar medidas para la restauración de en el caso de que hayan surgido problemas

- CHJ (Confederación Hidrográfica del Júcar), 2001. Redacción del plan de explotación de la unidad hidrogeológica 08.24 “Utiel-Requena”.
- CHJ (Confederación Hidrográfica del Júcar), 2016. Plan de explotación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel.

Teniendo en cuenta lo expuesto en el plan hidrológico del ciclo 2015-2021, el plan de explotación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel tiene como objetivo fundamental distribuir de manera adecuada la reserva de agua subterránea llevando a cabo una gestión y planificación eficiente de los recursos, aunque reconociendo la problemática acerca de la escasez de recursos hídricos en ésta.

Para la definición del plan se llevaron a cabo 4 reuniones con los usuarios de la masa (agrícolas, urbanos e industriales) donde se examinó la problemática existente y se propusieron distintas posibilidades para poder cumplir con las reservas en función de las dotaciones previstas al cultivo de la vid, el olivar y los frutales de fruto seco. Este plan nace del consenso entre todas las partes y se aprobó por la Junta de Gobierno en su sesión del 20 de diciembre de 2016.

En el capítulo VI del plan, se exponen las reservas de recursos subterráneos.

De los recursos que se establecen en el artículo 20.C).9 de la normativa del plan hidrológico, que suponen un total de 6,5 hm³/año, se reservan unos 6 hm³/año para la adecuación de las concesiones de regadío y de redotaciones en la comarca de Requena-Utiel. El volumen sobrante de 0,5 hm³/año se conservan para sufragar futuros crecimientos en la unidad de demanda urbana de Requena y de la industria de la zona.



De los nombrados 6 hm³/año, podrá hacerse uso de hasta 5,5 hm³/año para redotar a los clientes con concesiones para cultivo de vid y para satisfacer los aprovechamientos que estén en trámite. Los restantes 0,5 hm³/años podrán ser utilizados para tratar de mejorar la garantía de los regadíos superficiales con concesión.

En su capítulo VIII. Dotaciones, se establecen las dotaciones teniendo en cuenta el estado de la masa, los usos existentes y previsibles, las necesidades de cultivo y la reserva establecida en el plan hidrológico.

Puesta que las plantaciones necesitarán una cantidad de agua diferente en función de las condiciones climáticas del año, y de acuerdo con lo establecido en la normativa del plan, esta dotación puede variar en función de las precipitaciones a lo largo del año según los siguientes criterios:

1. Un año será considerado seco cuando la precipitación entre los meses de octubre y abril, incluyéndose los dos, no supere los 230 mm. En un año seco la dotación media bruta para el cultivo de la vid, el olivar y los frutales de fruto seco pasará de ser de 600 m³/ha/año a 900 m³/ha/año.
 2. Un año será considerado medio cuando la precipitación entre los meses de octubre y abril incluyéndose los dos, esté comprendida entre 230 y 310 mm. Esta dotación se mantendrá en 600 m³/ha/año.
 3. Un año será considerado húmedo cuando la precipitación entre los meses de octubre y abril, incluyéndose los dos, supere los 310 mm. En estos años la dotación media bruta para el cultivo de la vid, el olivar y los frutales de fruto se disminuirá hasta, como máximo, 450 m³/ha/año.
- CHJ (Confederación Hidrográfica del Júcar), 2019. Seguimiento del plan de explotación de la masa de agua subterránea 080.133 Requena-Utiel. Campaña del año hidrológico 2018/2019.

En el “Plan de explotación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel”, se anuncia que se publicará anualmente un seguimiento de la evolución de los recursos subterráneos y superficiales. En estos informes, que se publicarán en mayo de cada año, se establecerá la dotación de riego para la campaña de riego de ese mismo año.



Éste se trata del último informe de seguimiento del estado de la masa subterránea de agua Requena-Utiel, publicado en mayo de 2019. En cada uno de los informes elaborados se ha establecido una dotación bruta media para el cultivo de la vid diferente según la climatología del año.

En la campaña del año hidrológico 2016/2017 el periodo de octubre de 2016 a abril de 2017 correspondió a un año húmedo, por lo que la dotación bruta media fijada para el cultivo de la vid, el olivar y los frutales de fruto seco en la campaña de riego de 2017 sería de 450 m³/ha/año, de acuerdo al plan de explotación.

Por su parte, en la campaña del año hidrológico 2017/2018, este periodo correspondió a un año seco, fijando esta dotación en 900 m³/ha/año.

Por último, en la última campaña, la del año hidrológico 2018/2019, el periodo de octubre a abril se ha correspondido a un año medio, por lo que la dotación para la campaña de riego se ha fijado en 600 m³/ha/año.

Delimitación de la masa de agua subterránea

De estos estudios se ha recopilado la información que sirva de base para la elaboración del modelo matemático en referencia a la delimitación de ambas masas de agua subterránea objeto de estudio con su entorno. Estas delimitaciones se refieren a los bordes que las limitan físicamente, pero también a la litología de la zona y cómo el terreno influye en la hidrogeología.

- MIMAM (Ministerio de Medio Ambiente), 2005. Estudio inicial para la identificación y caracterización de las masas de agua subterránea de las cuencas intercomunitarias.
- IGME-DGA (Instituto Geológico y Minero de España – Dirección General del Agua), 2009. Apoyo a la caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015.
- IGME-DGA (Instituto Geológico y Minero de España – Dirección General del Agua), 2011. Informe sobre la caracterización básica de las masas de agua subterránea de la Confederación Hidrográfica del Júcar.

Modelos

A lo largo de los años se han llevado a cabo modelos numéricos que sirvieran de apoyo a la gestión de la masa de agua subterránea o bien para conocer su situación.



También se han concretado modelos en otros ámbitos relacionados con las masas subterráneas y que han servido o pueden servir para la recopilación de información para éstas. Entre ellos, los que han servido de base han sido los siguientes:

- CHJ (Confederación Hidrográfica del Júcar), 2001. En Redacción del plan de explotación de la unidad hidrogeológica 08.24 “Utiel-Requena”, capítulo 6, páginas 415-494.

Este modelo matemático se construyó como apoyo para la confección del plan de explotación, utilizando para ello el software Visual MODFLOW 2.8.2. Este modelo analizaba el estado en que se encontraba los niveles piezométricos tomando de referencia los niveles de septiembre del año 2.000. En esta época el número de pozos de extracción estaba cuantificado en 630.

Posteriormente se analizó un escenario en el que se incluyeran los pozos referentes a todas las solicitudes de derechos concesionales que se estaban tramitando.

Por último, en esta situación, se realizó un estudio a futuro en el que las parcelas dedicadas a viñedo de secano pasarán a ser de regadío en 2008. Aunque para esta situación el modelo no resultó muy fiable, la respuesta encontrada es que la masa se encontraría en un estado de sobreexplotación.

A partir de los resultados que se obtuvieron de este modelo, se llegó a la conclusión de que se habría de tener especial cuidado con el estado cuantitativo del acuífero. Basándose en este modelo, el plan de explotación se centró en llegar a una gestión sostenible del sistema.

- Mercé Gallo, A., 2015. Estudio de alternativas de gestión de agua subterránea en la cuenca del río Magro. Trabajo de fin de grado, Universitat Politècnica de València, 88 p.
- Fernández-Urizar, I., 2017. Modelación matemática del flujo de agua subterránea del acuífero de Requena-Utiel. Estudio del plan de explotación de la masa de agua. Trabajo de fin de máster, Universitat Politècnica de València, 95 p.

El modelo matemático que se construirá en este trabajo está basado en este último modelo, ya que es el modelo más reciente que se ha realizado para la masa de agua



Modelo matemático del flujo de agua subterránea de los acuíferos de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara (Valencia)



subterránea de Requena. Algunos de los datos que se utilizarán de partida se habrán recopilado de este modelo.

2.- Modelo conceptual

En este capítulo se describirá la región de estudio, incluyendo datos como la localización, la climatología, las interacciones del sistema con otras masas de agua subterránea en sus límites o con los cauces existentes, etc.

A partir de esta información, se elaborará un modelo conceptual que sirva de base para la construcción del modelo matemático.

2.1.- Localización del área de estudio

Las masas de agua subterránea Requena-Utiel (080-133) y Cabrillas-Malacara (080-139) están situadas en la zona central de la Demarcación Hidrográfica del Júcar (Ilustración 3). La primera cuenta con una superficie total de 987,90 km², de los cuales 966,40 km² están ubicados en la provincia de Valencia y el restante 21,50 km² en la provincia de Cuenca. El 96,8% de la superficie está dentro del sistema de explotación del Júcar, mientras que el resto pertenece al sistema de explotación del Turia. De los 987,90 km² de superficie de la masa de agua, 982,15 km² están considerados como permeables (prácticamente el 100% de la superficie), siendo la permeabilidad de la masa de agua de carácter medio mayoritariamente y, en algunas zonas, se presenta una permeabilidad alta.

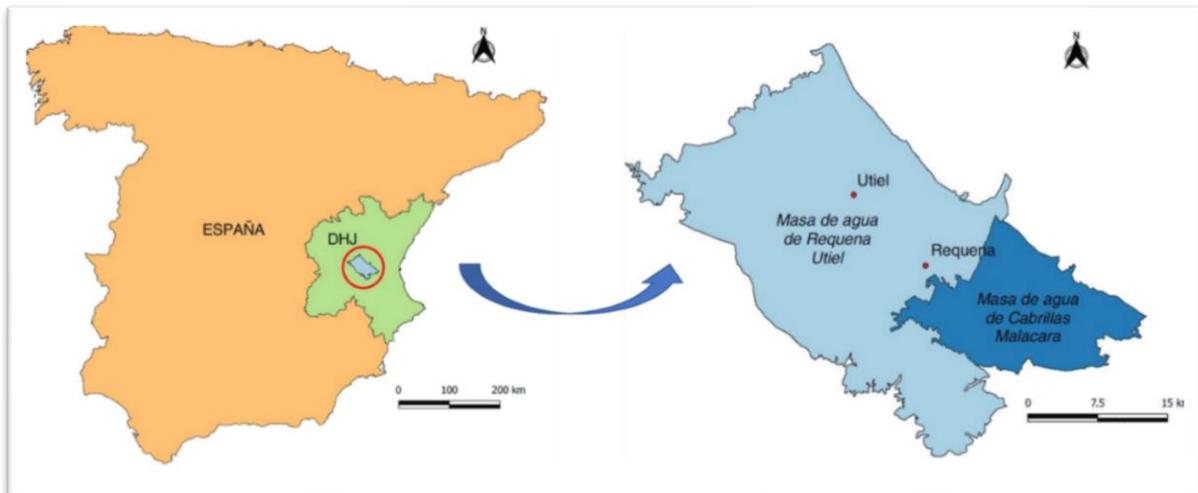


Ilustración 3. Localización de las masas de agua de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara.

Por otro lado, la segunda masa de agua subterránea, Cabrillas-Malacara, es colindante en su noroeste con la masa de Requena-Utiel y tiene una superficie de 286,34 km².

Sobre ambas masas de agua subterránea discurre el río Magro, el cual en cuya relación con éstas resulta como ganador.

2.2.- Modelo digital del terreno

Se dispone de un modelo digital del terreno que muestra la elevación del terreno de la zona de estudio. Se puede apreciar como ésta se encuentra a una altura que varía desde los 559 metros sobre el nivel del mar a los 1010, siendo la altura media de la zona de 750 m.

En la Ilustración 4 se puede apreciar como las zonas más altas se encuentran en el borde noreste de la región y en el noroeste, con algunos picos en la zona central de la masa de agua de Cabrillas-Malacara, mientras que los puntos más bajos se encuentran principalmente en la zona sudoeste de la masa de agua de Requena-Utiel y alrededor de los mencionados picos en la masa de agua de Cabrillas-Malacara.

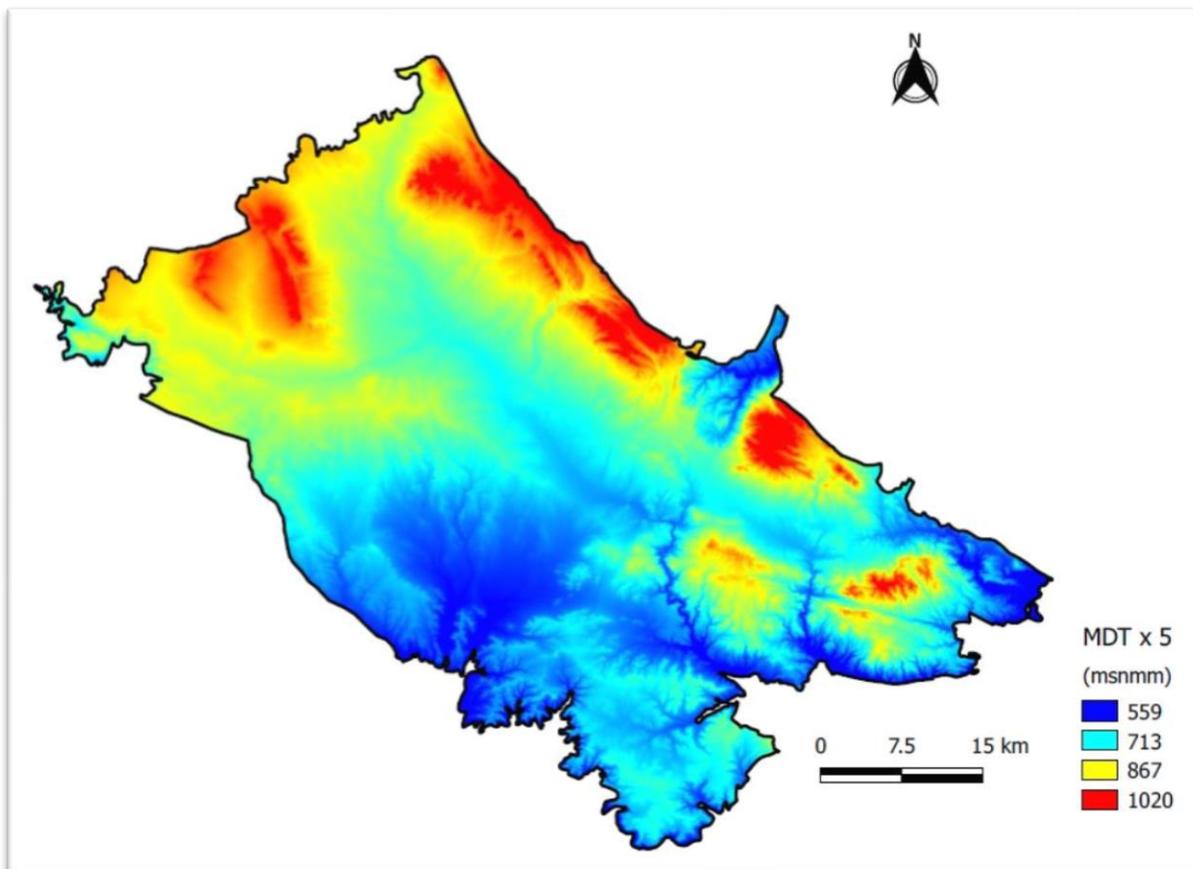


Ilustración 4. Modelo digital del terreno.

2.3.- Contexto hidrológico

2.3.1.- Climatología

El clima de la zona se califica como mediterráneo con algunos rasgos de continentalidad debido a su alejamiento del mar y a la altitud de algunas zonas, caracterizado por unos notables contrastes térmicos y de precipitación.

La región se caracteriza por su sequedad, con dos estaciones lluviosas, un verano corto y un invierno de heladas muy largo.

Existe una gran amplitud térmica que se puede dar entre las estaciones cálidas y frías o incluso entre el día y la noche.

Temperatura

La temperatura media anual en la zona durante el periodo 1940/41 a 2015/16 es de aproximadamente 13,6 °C, mientras que durante el periodo de 1980/81 a 2015/2016 es de unos 14 °C, observándose un leve aumento de la temperatura media en los últimos años. Estos datos pueden corroborarse mediante la Ilustración 5, que muestra la temperatura media anual desde 1940/41 hasta 2015/16.

Las temperaturas más altas se registran en los meses de julio y agosto, con una temperatura media prácticamente igual, levemente superior a los 31 °C, mientras que el mes más frío es enero, con un promedio de 10,6 °C, seguido de diciembre (11 °C).

Como se ha comentado anteriormente, la zona se caracteriza por un verano corto y un invierno largo y una gran variación de temperatura incluso en el mismo día, registrándose temperaturas de hasta 40 °C en verano y de mínimas de 15 °C bajo cero en invierno.

Dado el relieve de la región, se da un decrecimiento de las temperaturas con la altura, que conlleva a fenómenos de inversión térmica pronunciados en algunos valles.

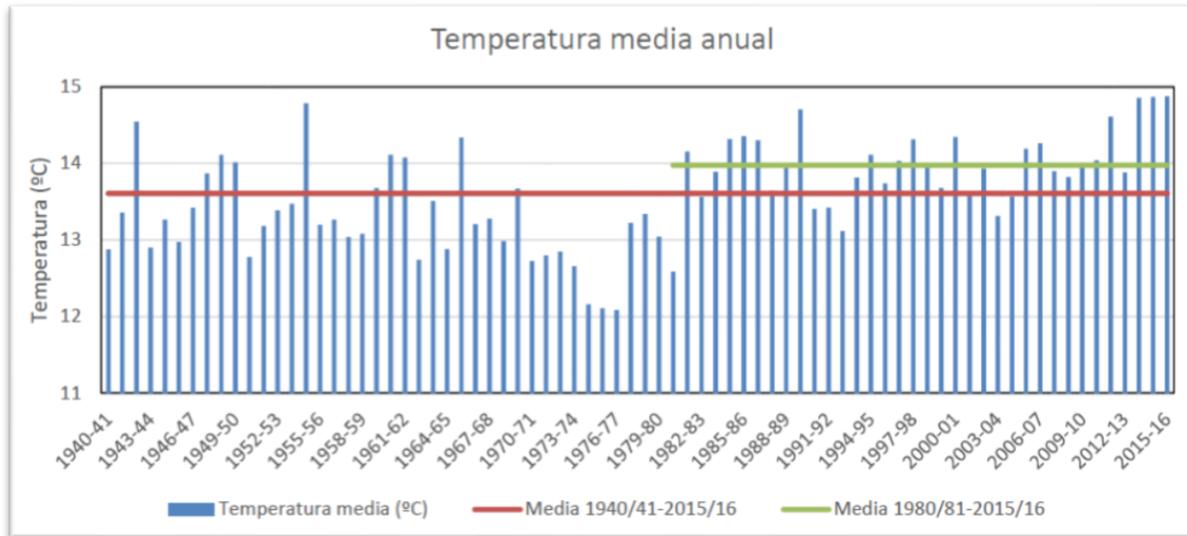


Ilustración 5. Temperatura media anual.

Además, en el municipio de Requena hay instalada una estación del SiAR (Sistema de Información Agroclimático para el Regadío), siendo una de las mayores fuentes de datos en el ámbito agroclimático, de la que también se han obtenido datos referentes a la meteorología.

Esta estación está situada a una altitud de 692 m y fue instalada durante el verano de 1999. De ella se pueden obtener datos meteorológicos diarios, semanales o mensuales, a partir de los cuales se ha podido constatar que la temperatura media en el periodo comprendido entre 2001 y 2016 es de 13°C, habiéndose alcanzado en los últimos años temperaturas máximas de hasta 37 °C en verano y mínimas de hasta 3°C bajo cero en invierno.

En la Ilustración 6, puede observarse el contraste térmico a lo largo de un mismo día, rondando una diferencia de alrededor de 20 °C entre el día y la noche en los meses de verano y en torno a 10 °C en las épocas invernales.

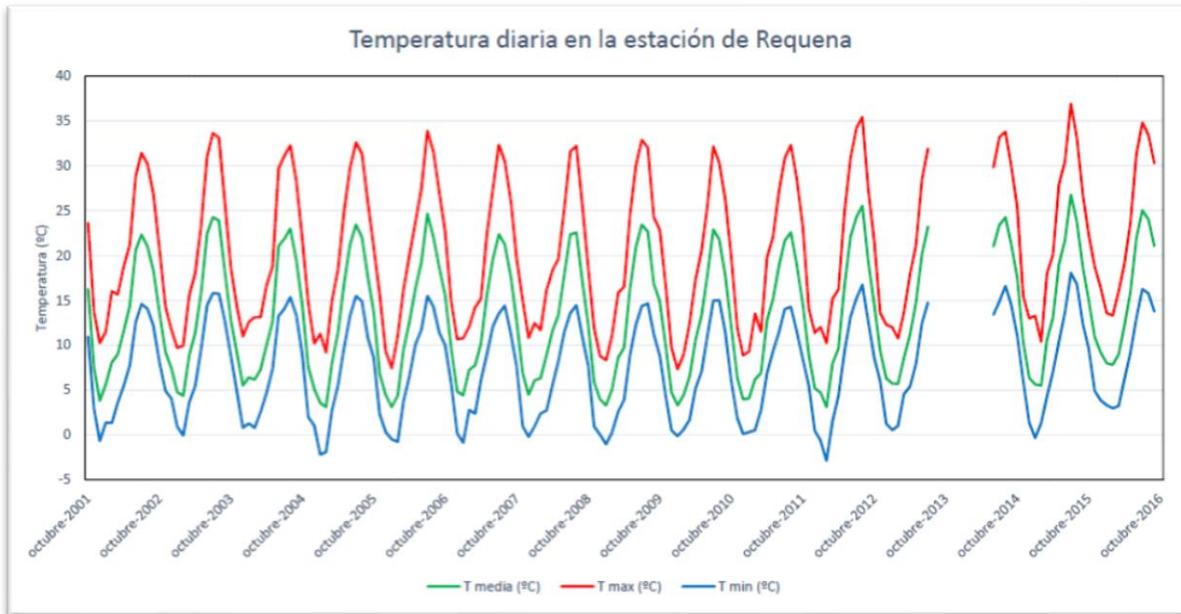


Ilustración 6. Temperatura diaria en la estación de Requena.

Precipitación

En cuanto a los datos recopilados sobre las precipitaciones, la precipitación media anual en la zona durante el periodo que va desde 1940/41 hasta 2015/16 es de 424 mm, y durante el periodo de 1980/81 a 2015/16 es de 408 mm, apreciándose una tendencia levemente decreciente en los últimos años. No obstante, los valores pueden llegar a ser muy diferentes de un año a otro (Ilustración 7).

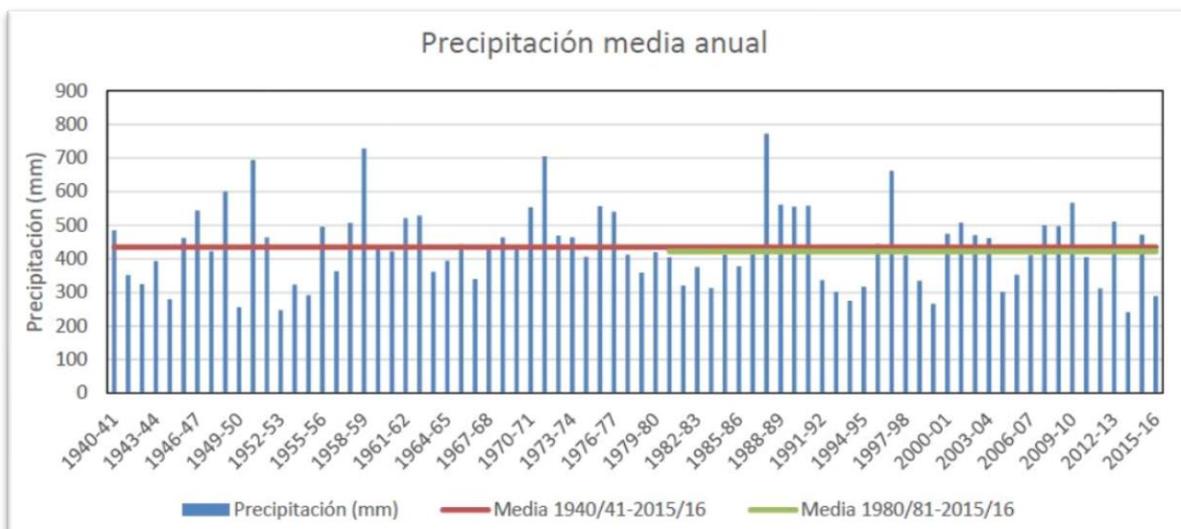


Ilustración 7. Precipitación media anual.

Las lluvias en la zona son muy irregulares, siendo los meses de abril y octubre los más húmedos, coincidiendo con los meses de recolección de la uva.

En verano las precipitaciones son muy bajas, lo que provoca ascensiones rápidas de masas de aire recalentando que vienen seguidas de tormentas, comúnmente acompañadas de granizo, principalmente en las últimas semanas de verano.

Por el contrario, en invierno son habituales las precipitaciones en forma de nieve.

En la gráfica representada en la ilustración 8, la cual ha sido creada a partir de los datos de precipitación registrados en la ya nombrada estación del SiAR ubicada en Requena, se han plasmado los datos de precipitación media mensual entre los años 2001 y 2016. Puede observarse como los meses más lluviosos son los de abril, mayo, septiembre y octubre, en los que la precipitación media se encuentra próxima a los 50 mm, mientras que, por otro lado, los meses más secos son los de julio y agosto, en los que ésta es, aproximadamente, de 10 y 20 mm, respectivamente.

De todos estos datos climatológicos se constata lo anteriormente expuesto acerca de la sequedad de la región, así como dos estaciones lluviosas, un verano corto y un invierno muy largo con, en ocasiones, heladas, además de grandes contrastes térmicos tanto interestacionales como entre el día y la noche.

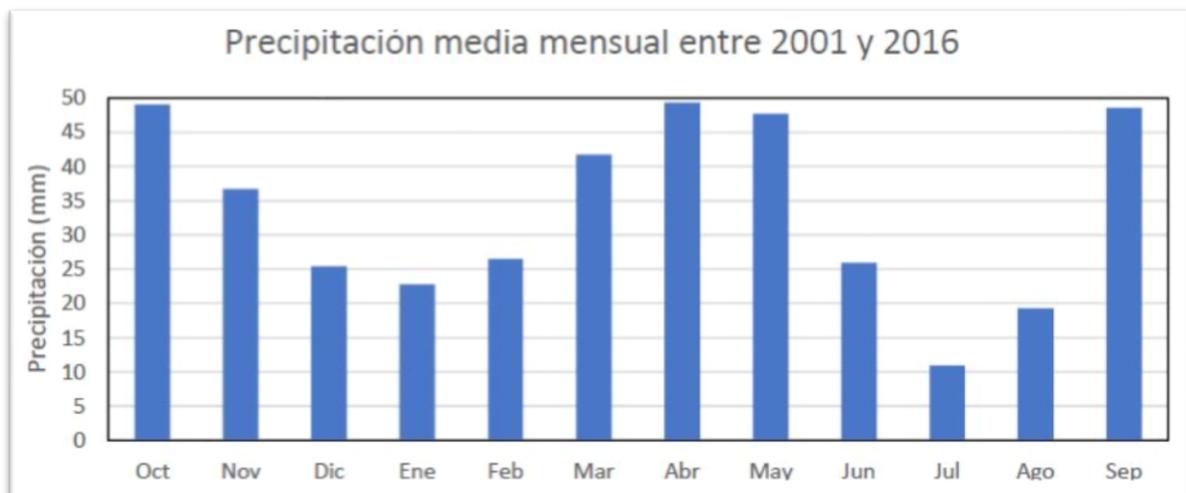


Ilustración 8. Precipitación media mensual entre 2001 y 2016.

2.3.2.- Recursos hídricos superficiales

A continuación se repasarán aquellas masas de agua superficiales, como ríos o embalses, que se encuentran en la región o próximas a ella y que pueden verse afectadas por los cambios en las masas de agua subterráneas de Requena-Utiel o Cabrillas-Malacara, o, de manera inversa, puedan afectar a éstas.

Red fluvial

En el área que forman ambas masas de agua, se encuentran el río Magro, el cual nace de la unión de sus afluentes el río Madre y la Rambla de la Torre, recorriendo de noroeste a sureste la masa de Requena-Utiel y parte de la de Cabrillas-Malacara; el río Reatillo, que únicamente cruza por el este de Requena-Utiel de forma fugaz; el río Romeroso, que discurre por el borde oeste de la masa y no parece tener mucha aportación; y los ríos Buñol y Mijares, pertenecientes a la masa de Cabrillas-Malacara.

Según la información aportada por el IGME-DGA (2011), todos los ríos del sistema son ganadores. Sin embargo, a partir del estudio de Martínez Gil (2018), *Estudio de la conexión río-acuífero del río Magro (Valencia)*, la Rambla de la Torre, el río Madre y el río Magro serían ganadores hasta a partir de los años 1985 a 1990, que pasarían a ser perdedores, a excepción de la zona bajo la confluencia de los dos primeros para formar el tercero.

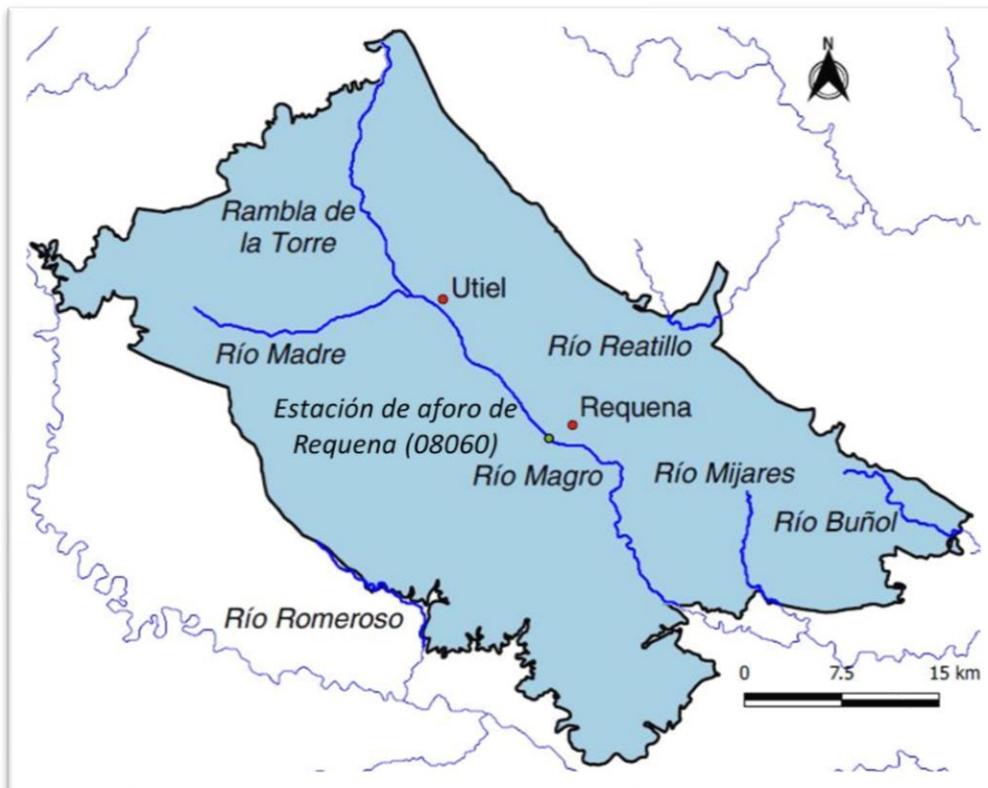


Ilustración 9. Red fluvial en las masas de agua subterránea Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara.

La única estación de aforos ubicada en la zona y que puede servir para extraer información se ubica en el río Magro, a la altura del municipio de Requena. Los datos registrados en esta estación se muestran en la ilustración 10.

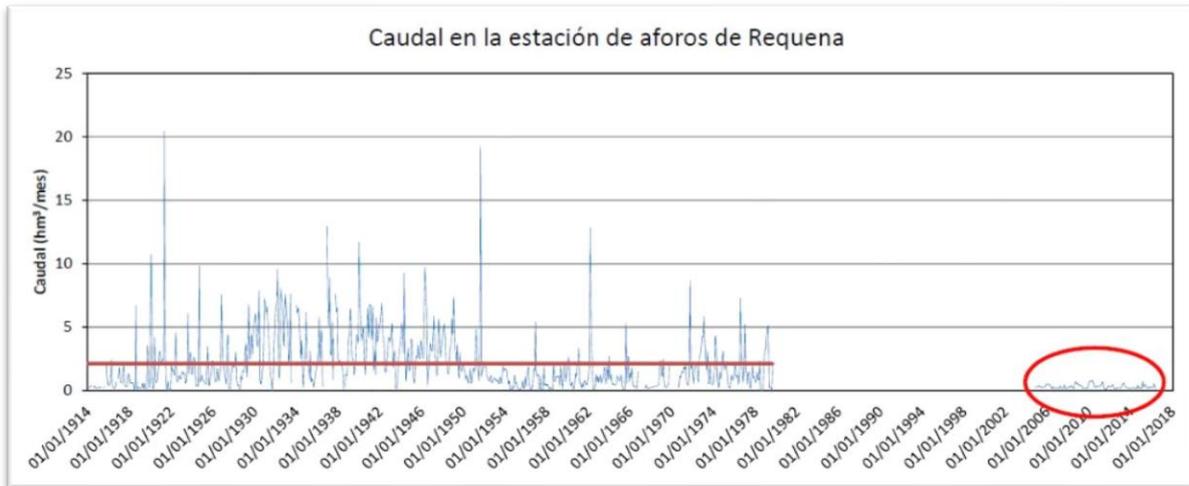


Ilustración 10. Caudales registrados en la estación de aforos de Requena.

Como puede apreciarse, se han registrado dos periodos de tiempo. En el primero de ellos, que data del año 1914 hasta 1980, el caudal aforado medio es de 2,13 hm³/mes, mientras que, en el segundo, entre los años 2004 y 2018, la media pasa a 0,33 hm³/mes, significando una clara disminución (ver detalle en la ilustración 11).

Entre ambos periodos no existen datos registrados de los caudales, por lo que no puede observarse qué ocurre entre los años 1980 y 2004, siendo imposibles conocer la evolución del caudal hasta llegar a un caudal tan pequeño.



Ilustración 11. Caudales registrados en la estación de aforos de Requena entre los años 2004 y 2016.

Es posible que el decrecimiento de estos caudales sea debido al aumento de la explotación de los acuíferos de la zona que han provocado la disminución de los niveles piezométricos, repercutiendo así sobre el caudal circulante del río.



La Rambla Ruices, nombre que recibe el Romeroso antes de la confluencia con el Cabriel, está caracterizada como ocasional o episódico. No parece que vaya a tener mucha aportación, por lo que no será considerado en el modelo.

El río Mijares parece estar desconectado del acuífero y no suele llevar agua, aunque está caracterizado como ganador por el IGME y podría haber llevado agua en el pasado. Por estos motivos, tampoco se incluirá en el modelo.

Acerca del río Buñol se estima que, en los meses más fríos, de noviembre a febrero, circula un caudal mínimo de 100 l/s (8.640 m³/día). En este caso, el río Buñol sí se considerará parte importante del modelo.

En cuanto al río Reatillo, el único dato del que se dispone como aportaciones del río son las entradas al embalse de Buseo. Debido a la poca información y en base a ésta, no se considerará en el modelo.

Embalses

Dentro de la zona de estudio no existe ningún embalse, siendo los más próximos el de Contreras, en la confluencia de los ríos Cabriel y Gaudazón, estando situado junto al borde noroeste de la masa de Requena-Utiel, y el de Forata, en el cauce del río Magro al sureste de ambas masas (Ilustración 12).

En este caso, el único que puede aportar información que sea relevante es el de Forata, que se sitúa en el río Magro aguas abajo de la zona de estudio.

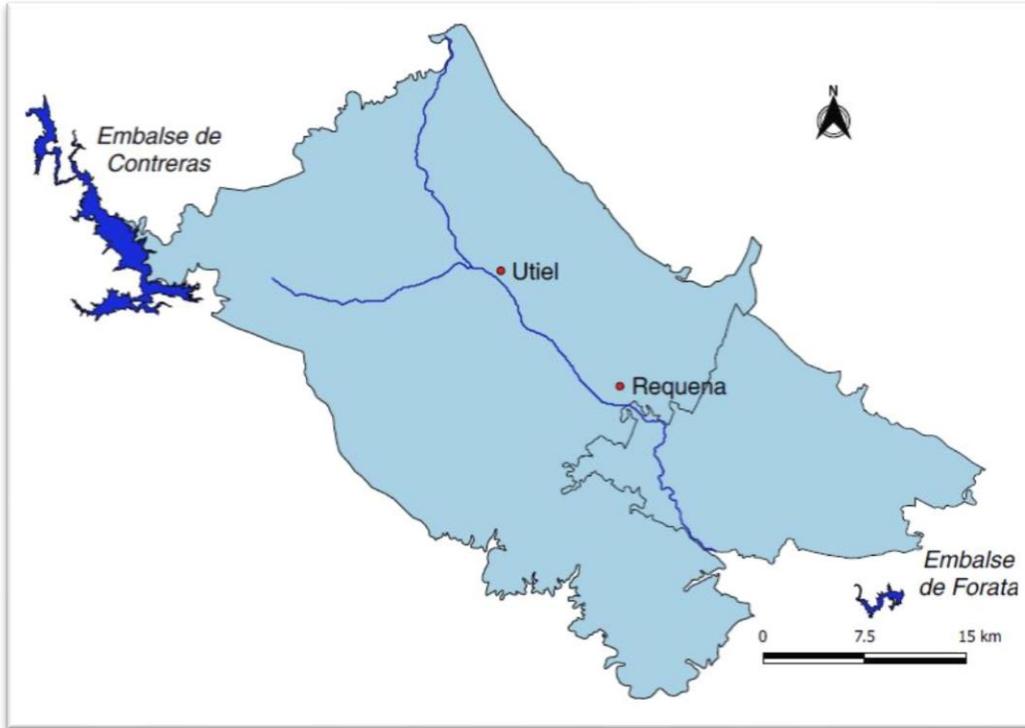


Ilustración 12. Embalses más cercanos a las masas de agua subterránea RU-CM.

Los caudales de entrada a éste presentan un descenso a partir de 1993 (Ilustración 13), coincidiendo con la disminución de caudales circulantes en el río, a causa del descenso de los niveles piezométricos de las aguas subterráneas, suponiendo una problemática para las demandas que se abastecen de este embalse (principalmente para riego).

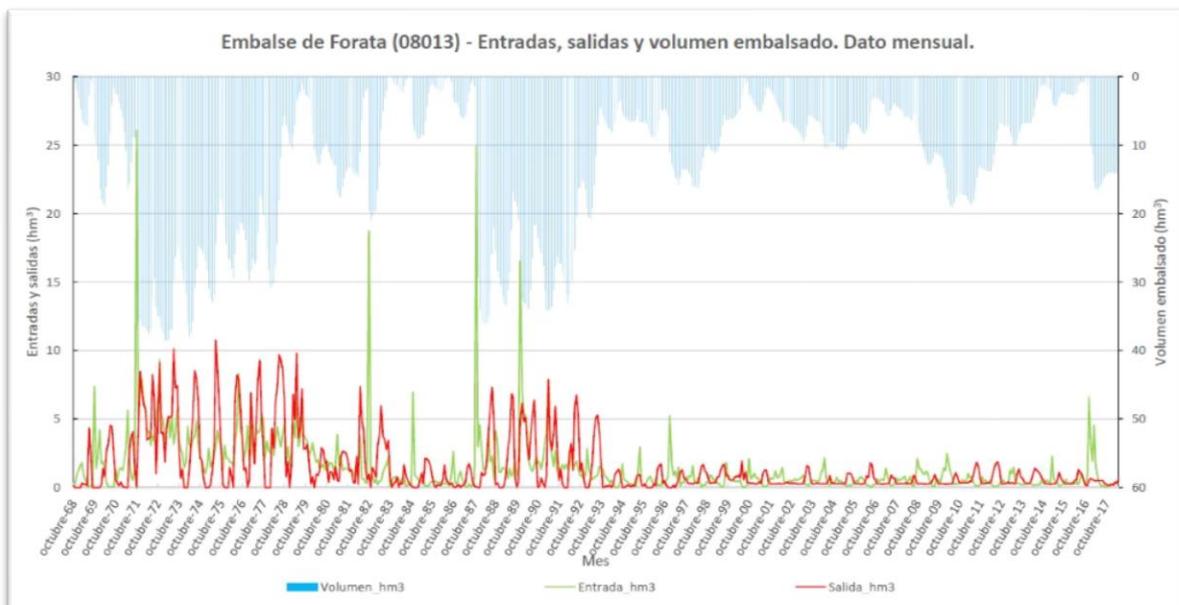


Ilustración 13. Datos de entradas, salidas y volumen embalsado en el embalse de Forata.

Manantiales

Para este trabajo no se tendrán en cuenta los manantiales que nacen de las masas de agua subterránea Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara.

2.4.- Contexto hidrogeológico

En este apartado se definirán aquellos aspectos hidrogeológicos que tienen incidencia en los sistemas de las masas de agua subterránea y que, de una manera u otra, influirán en los resultados obtenidos en el modelo.

2.4.1.- Límites del sistema

En primer lugar, es conveniente definir los bordes que delimitan con la zona de estudio. A continuación se enumeran las distintas masas de agua subterránea colindantes con ésta y que podrían tener una transferencia de agua con ella (Ilustración 14):

- Al este se encuentra la masa de agua subterránea 080.132 Las Serranías. Éstas se unen a la traza de cabalgamiento entre los municipios de Sinarcas y Buñol.
- Al sureste existe la masa de agua subterránea 090.140 Buñol-Cheste.
- A lo largo del límite oeste se encuentra la masa de agua subterránea 080.135 Hoces de Cabriel.
- Al norte se encuentran las formaciones cretácicas de la masa de agua subterránea 080.134 Mira.
- Al suroeste el límite es totalmente impermeable, siendo el flujo de transferencia completamente nulo.

Además, existen otros tramos del límite en los que es totalmente impermeable, como los situados al noroeste de la masa de agua, entre las masas subterráneas de Mira y Hoces del Cabriel y el situado al sureste, entre las masas de Buñol-Cheste y Sierra del Ave.

Hay que resaltar que la concreción de estos límites no ha sido una tarea sencilla. En los contornos norte y este existe una continuidad hidrogeológica de las formaciones, resultando complicado fijar un límite físico, por lo que se hace necesario establecer uno. Más sencillo ha sido definir el borde oeste ya que las formaciones existentes son

de un bajo interés hidrogeológico. Por su parte, el límite sur se encuentra en contacto con formaciones totalmente impermeables hidrogeológicamente.

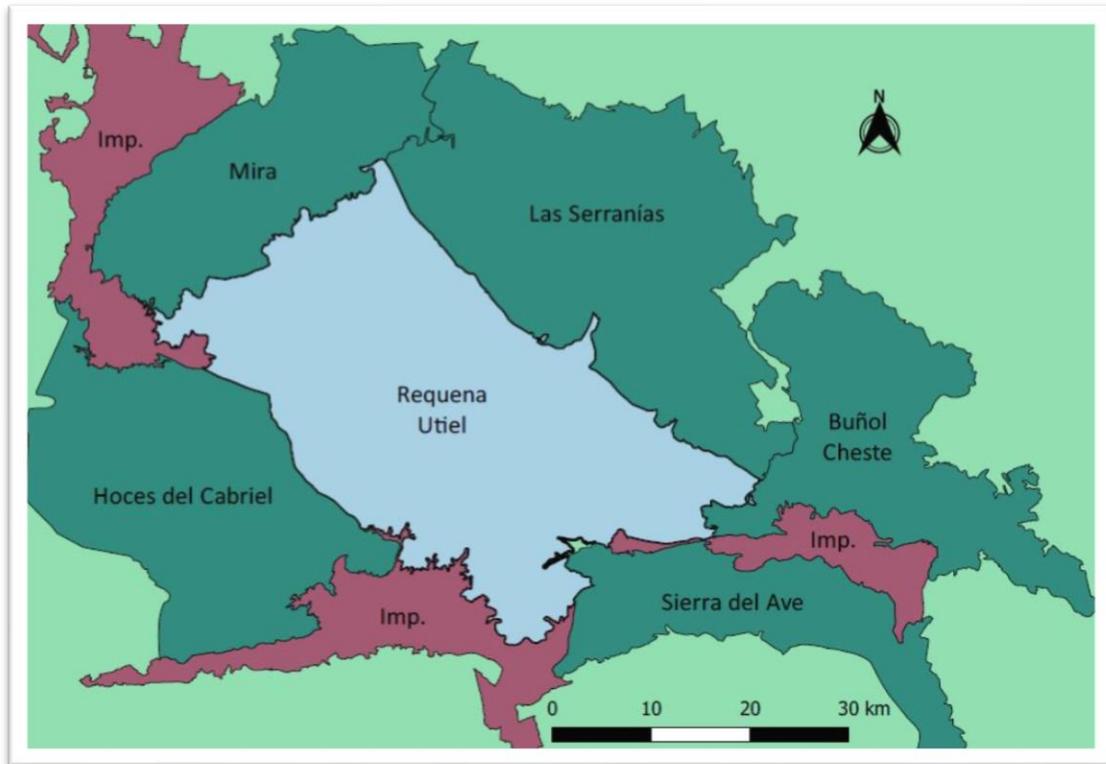


Ilustración 14. Límites del sistema.

2.4.2.- Unidades hidrogeológicas

En el Reglamento de la Administración Pública del Agua y la Planificación Hidrológica, publicado en 1988, se introdujo el término de “unidad hidrogeológica” que, en su art. 2.2. decía: “Por unidad hidrogeológica se entiende uno o varios acuíferos agrupados a efectos de conseguir una racional y eficaz administración del agua”, incluyéndola como una herramienta de gestión, y que se delimitarían poco después en toda la península en los Planes Hidrológicos de Cuenca.

Las unidades hidrogeológicas que se plantean en este estudio, basándose en las definidas por la CHJ en la *Redacción del plan de explotación de la unidad hidrogeológica 08.24 “Utiel-Requena”*, 2001 y obtenidas a partir de los datos litológicos de los que se disponen en la masa de agua de Requena-Utiel, son:

- Acuífero cuaternario: libre por naturaleza, compuesto por materiales detríticos del aluvial del Magro y glaciais de la Sierra de Utiel
- Acuífero mioceno, dividido en dos sistemas:



- Mioceno calcáreo: se trata como acuífero libre y está compuesto por calizas pontienses drenadas por materiales de borde.
- Mioceno conglomerático de base: tiene un comportamiento característico de un acuífero confinado o semiconfinado, dependiendo de las zonas, y se compone de niveles alternantes de conglomerados y areniscas con tramos arcillosos y conglomerados de la formación terciaria.

En cuanto a la masa subterránea de agua Cabrillas-Malacara, se componen de las mismas unidades hidrogeológicas, ya que se extienden a lo largo de ésta.

Todos los acuíferos se encuentran sobre una base impermeable de facies de Keuper.

En la ilustración 15 se muestran las alturas de cada una de las capas que componen las masas de agua subterránea, que se corresponden a:

- Techo: altura del techo de la capa 1
- Base 1: cota de la base de la capa 1
- Base 2: cota de la base de la capa 2.
- Base 3: cota de la base de la capa 3, donde acaba la formación modelada.

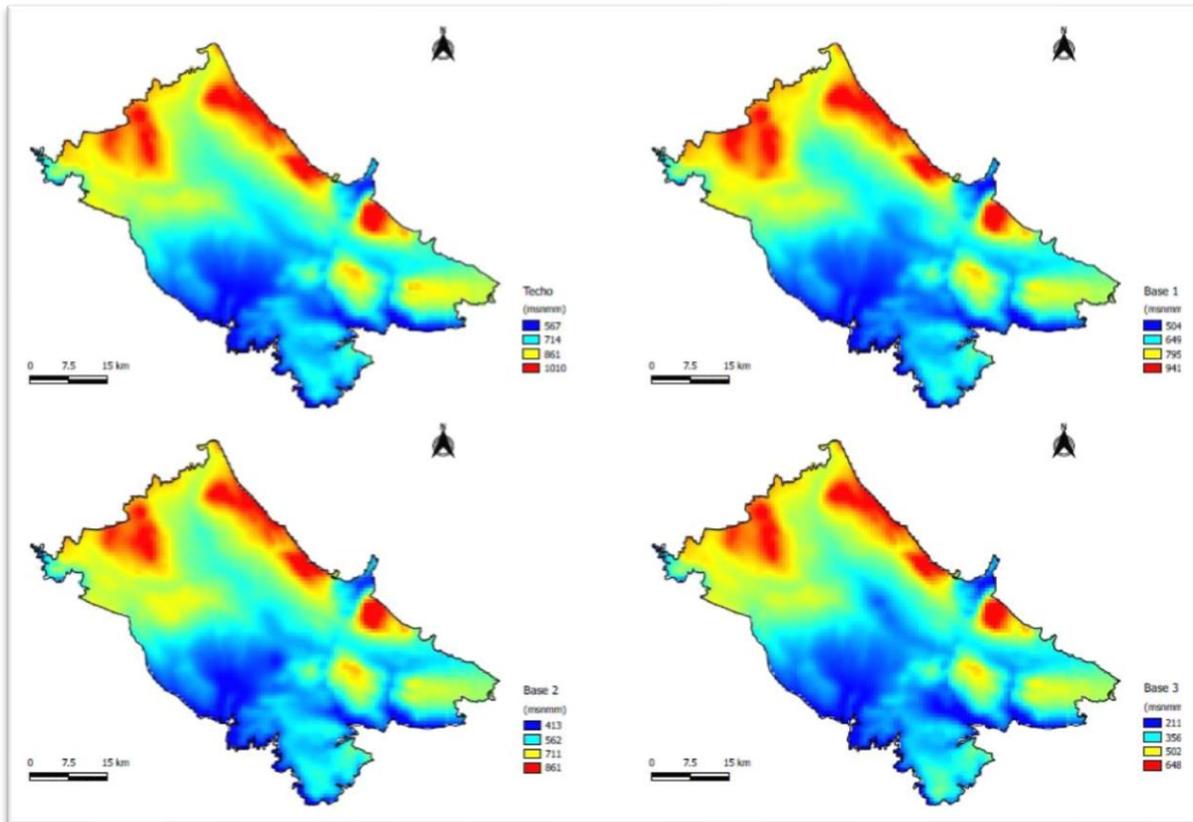


Ilustración 15. Modelo de las alturas de las diferentes unidades hidrogeológicas.

2.4.3.- Dominios hidrogeológicos

Para obtener los dominios hidrogeológicos que destacan en la zona de estudio se ha realizado un análisis de los mapas hidrogeológicos, litológicos y de permeabilidad existentes, así como de las fichas de caracterización de las masas de agua subterráneas (Ilustración 16).

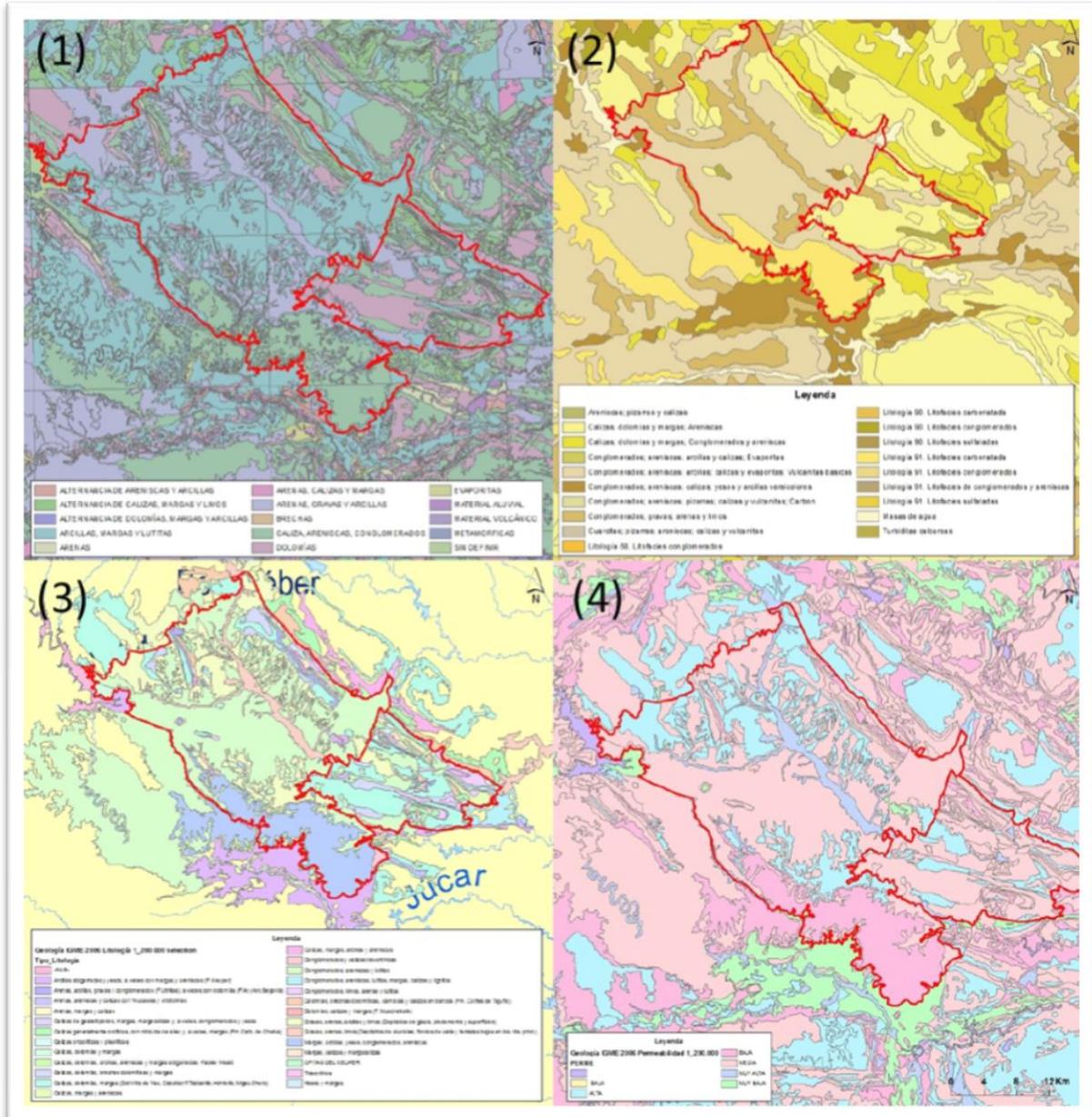


Ilustración 16. (1) Geología a partir de MAGNA. (2) Geología a partir del IGME. (3) Litología a partir del IGME (4) Permeabilidad a partir del IGME.

A partir de esta información se han determinado los cuatro dominios hidrogeológicos principales que componen las masas de agua subterráneas y que se enumeran a continuación. También pueden verse representadas en la Ilustración 17.

- Dominio 1: consta de formaciones de una permeabilidad muy alta. Gravadas, arenas, limos (depósitos aluviales, fondos de valle y terrazas bajas en los ríos principales).
- Dominio 2: se trata de formaciones de alta permeabilidad, entre las que destacan las arenas, margas y calizas.

- Dominio 3: son formaciones de permeabilidad media. Entre éstas se encuentran calizas y margas de menor tamaño de grano, y dolomías.
- Dominio 4: principalmente arcillas y yesos, aunque también se cuentan margas de aun menor tamaño de grano que en el caso anterior. Por ello, estas formaciones son consideradas de una permeabilidad baja.

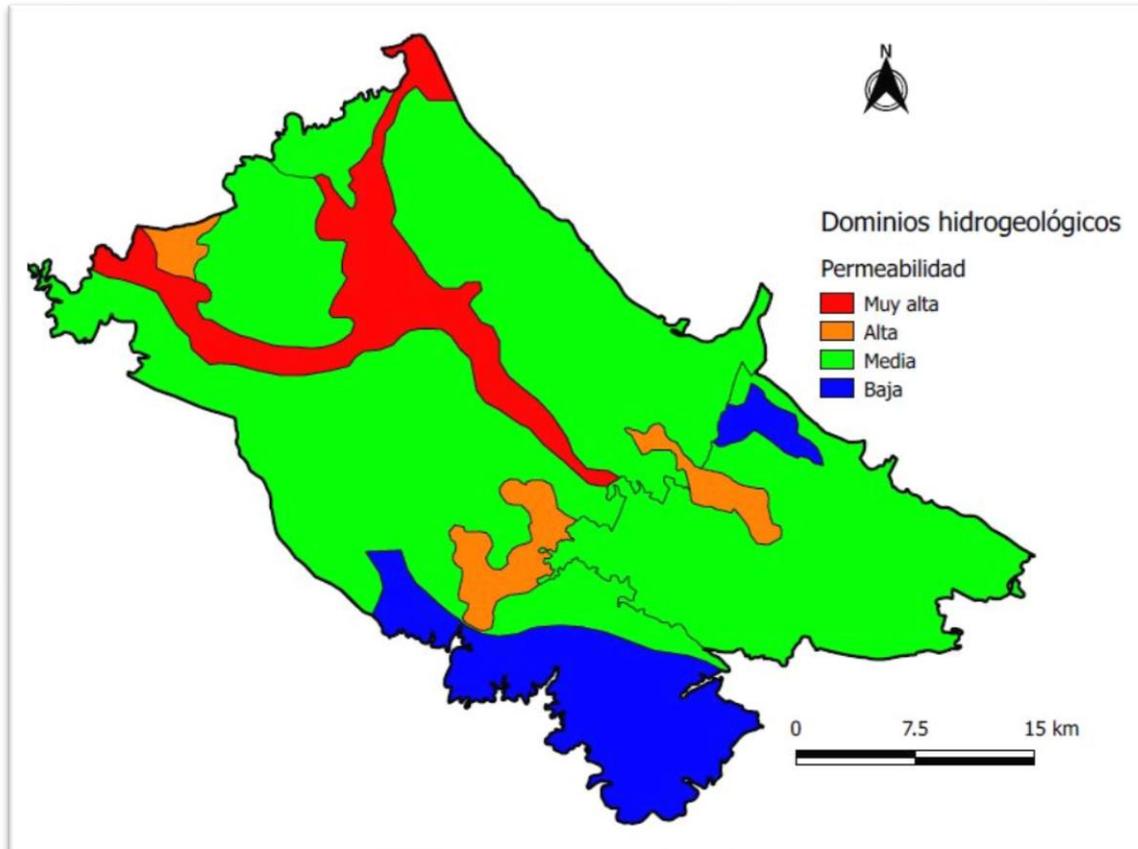


Ilustración 17. Dominios hidrogeológicos de las masas de agua subterránea Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara.

2.5.- Recarga

El método por el cual los recursos subterráneos se renuevan es a través de procesos activos de recarga desde la superficie. Parte del agua de las precipitaciones se infiltra en el terreno y llega hasta las masas de agua subterránea.

La recarga a introducir en el modelo se ha obtenido a partir del trabajo realizado por Pérez-Martín, M. A. (2005) en su trabajo *Modelo distribuido de simulación del ciclo hidrológico con calidad de aguas integrado en sistemas de información geográfica para grandes cuencas. Aportación al análisis de presiones e impactos de la Directiva Marco Europea del Agua*, estimada mediante PATRICAL, considerando la misma zonificación que la utilizada en dicho modelo (Ilustración 18).

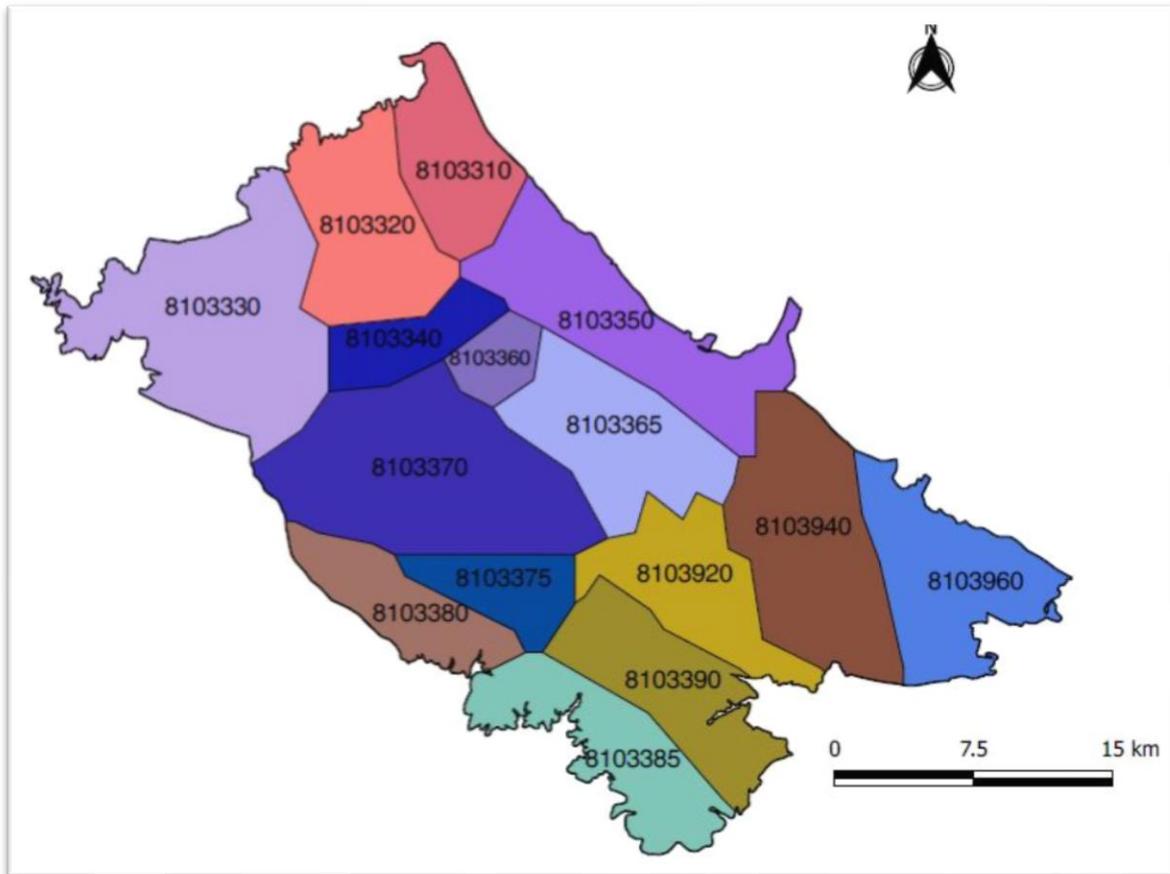


Ilustración 18. Zonificación de la recarga en las dos masas de agua subterránea.

Esta recarga, que ha sido muy variable a lo largo de los años, tiene un valor medio de 50 hm^3 al año en el periodo que abarca desde 1940 hasta 2016, siendo este valor el mismo que el registrado en el periodo que va desde 1980 a 2016, indicando que, a pesar de esta variabilidad, la cantidad media de agua que han recibido las masas subterráneas se ha mantenido en los últimos años (Ilustración 19).

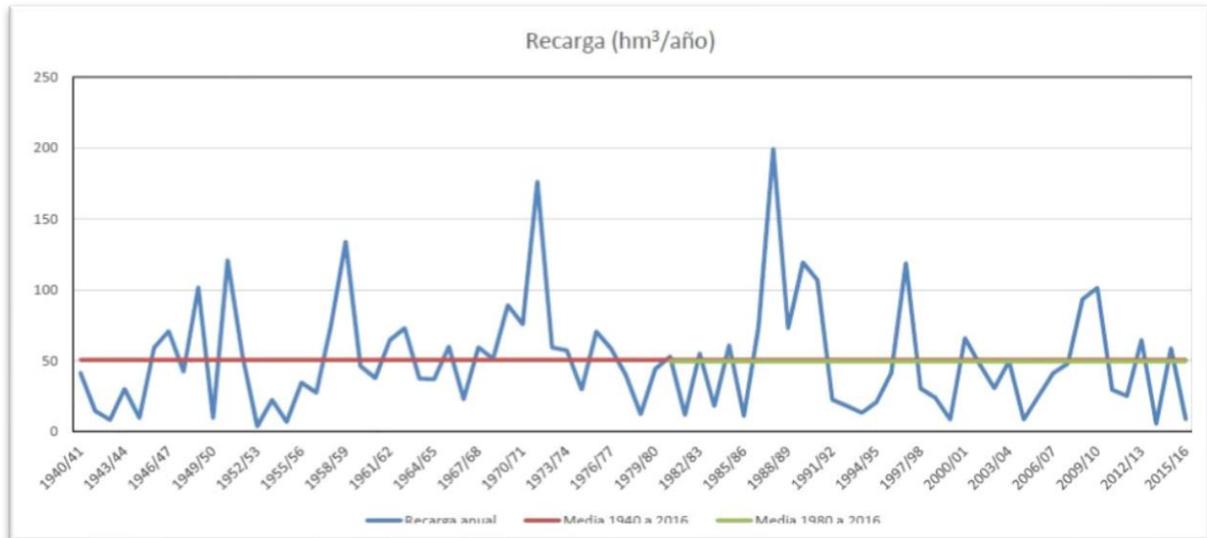


Ilustración 19. Evolución de la recarga anual en la zona de estudio.

También se tendrá en cuenta la recarga a través de los retornos de riego, que será en volumen mucho menor.

2.6.- Bombeos

Una parte importante de las demandas en la zona de estudio es abastecida por recursos que provienen de las masas de agua subterránea Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara. Un porcentaje muy elevado de esta demanda está destinada al regadío de cultivos. Sin embargo, la extracción de agua para el abastecimiento de demandas urbanas también supone un gran volumen.

Tal y como se comentaba anteriormente, el principal problema de la masa de agua subterránea Requena-Utiel es el descenso de los niveles piezométricos que se ha registrado en los últimos años. Este descenso se debe principalmente a la sobreexplotación del recurso subterráneo mediante el bombeo de agua. Es por este motivo por el cual es de suma importancia conocer el estado actual respecto a los pozos de extracción.

Hoy en día hay contabilizados 1170 pozos, de los cuales alrededor del 90% están destinados a la demanda agrícola y casi el 95% del total están situados en la masa de agua subterránea Requena-Utiel (Ilustración 20 y Tabla 1). Este número de pozos de extracción supone un aumento considerable respecto a los contabilizados en el modelo realizado en el año 2001, que eran aproximadamente 700.

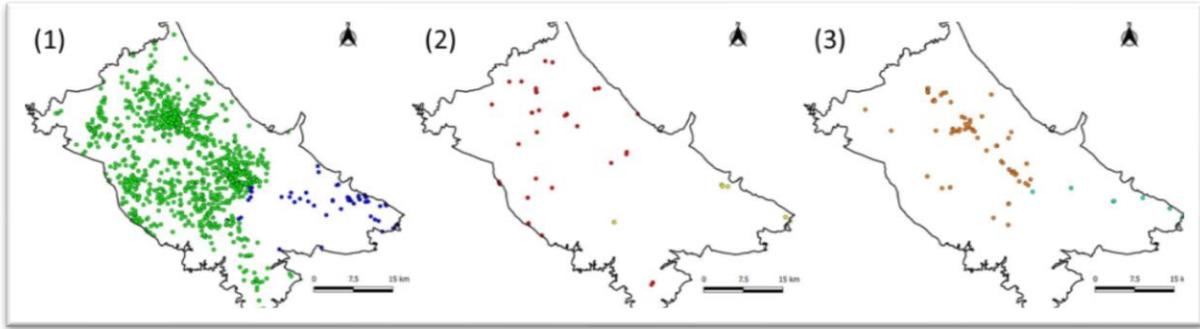


Ilustración 20. Pozos contabilizados para satisfacer la demanda (1) agrícola, (2) urbana, (3) industrial.

	Agrícola	Urbana	Industrial
Requena-Utiel	1001	38	63
Cabrillas-Malacara	55	6	7

Tabla 1. Número de pozos existentes en cada masa de agua subterránea clasificados según el tipo de demanda.

A pesar de la diferencia de pozos dedicados a la demanda agrícola, la cantidad de agua extraída para satisfacer la demanda urbana e industrial supone una gran suma. En el caso de la masa Requena-Utiel, la cantidad de agua bombeada destinada al ámbito urbano e industrial en el año 2015/16 supuso aproximadamente un 25% del total.

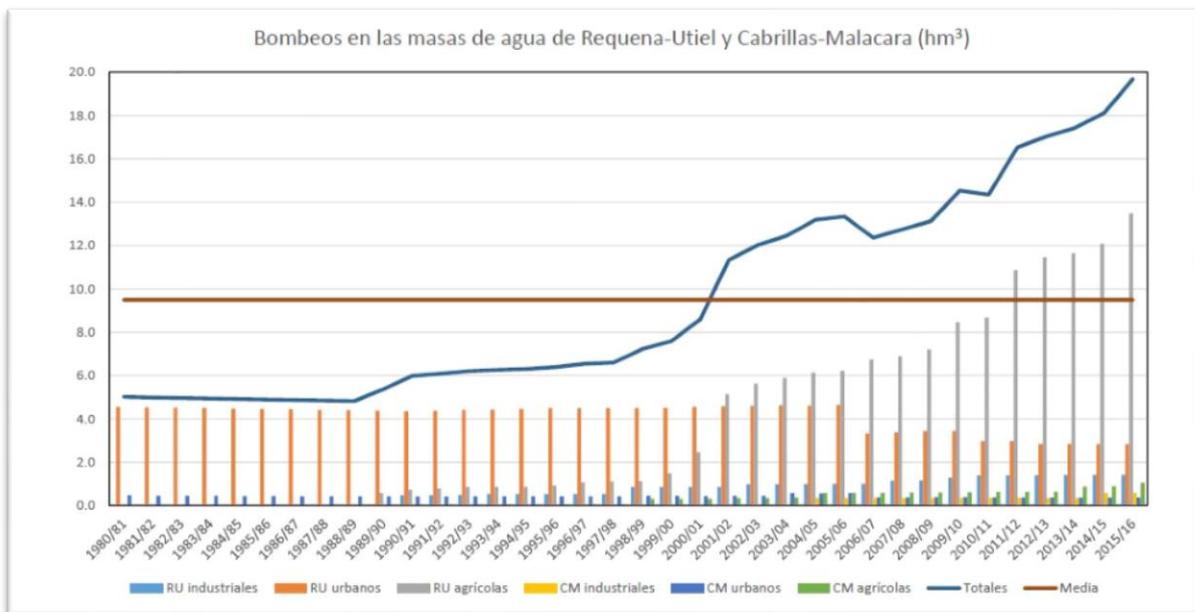


Ilustración 21. Cantidad de agua extraída en ambas masas de agua subterránea.

2.7.- Modelo hidrogeológico conceptual

Una vez conocidos aquellos elementos que forman parte del sistema compuesto por las masas de agua subterránea Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara, es importante



definir un modelo hidrogeológico conceptual que relacione todos estos elementos con los acuíferos antes de construir el modelo matemático.

Un modelo conceptual es una representación esquemática del sistema que se va a analizar. Teóricamente, cuanto más parecido sea este modelo conceptual a la realidad, más fiable será el modelo numérico. De este modo, los errores que surgen en los modelos matemáticos se deben, generalmente, a errores en el modelo conceptual.

El objetivo principal de su creación es la de simplificar la problemática real y organizar la información obtenida sobre él, de forma que resulte más sencillo el análisis del sistema.

Entrando en la construcción del modelo conceptual, entre las entradas más significantes al sistema se encuentran la recarga por infiltración, las pérdidas del cauce en favor de la masa subterránea, y las transferencias laterales de una masa de agua subterránea colindante, mientras que las salidas de agua del mismo son debidas a las pérdidas de la masa de agua hacia el río, las transferencias laterales entre masas de subterráneas y, principalmente, la extracción mediante pozos de bombeo.

La entrada principal de agua al sistema se produce a través de la recarga que produce la infiltración del agua de lluvia en el terreno. Esta información, como ya se ha comentado, se ha obtenido zonificando el área de estudio siguiendo la distribución en PATRICAL (Pérez-Martín, 2005).

Las transferencias laterales de flujo vienen determinadas por los límites del sistema, que ya fueron definidos en un apartado anterior. A continuación se enumera cada uno de los límites y como interaccionan con las masas de agua objeto de este trabajo, a partir de la caracterización descrita en las fichas de masas de agua subterránea (IGME-DGA, 2011):

- Mira: existe un flujo hacia Requena-Utiel de alrededor de $10 \text{ hm}^3/\text{año}$.
- Las Serranías: se trata de una conexión variable dependiendo de la piezometría de la zona.
- Buñol-Cheste: recibe un flujo desde Cabrillas-Malacara de unos $3 \text{ hm}^3/\text{año}$.
- Hoces de Cabriel: se considera como un contorno impermeable, por lo que no existe transferencia de flujo en ningún sentido.

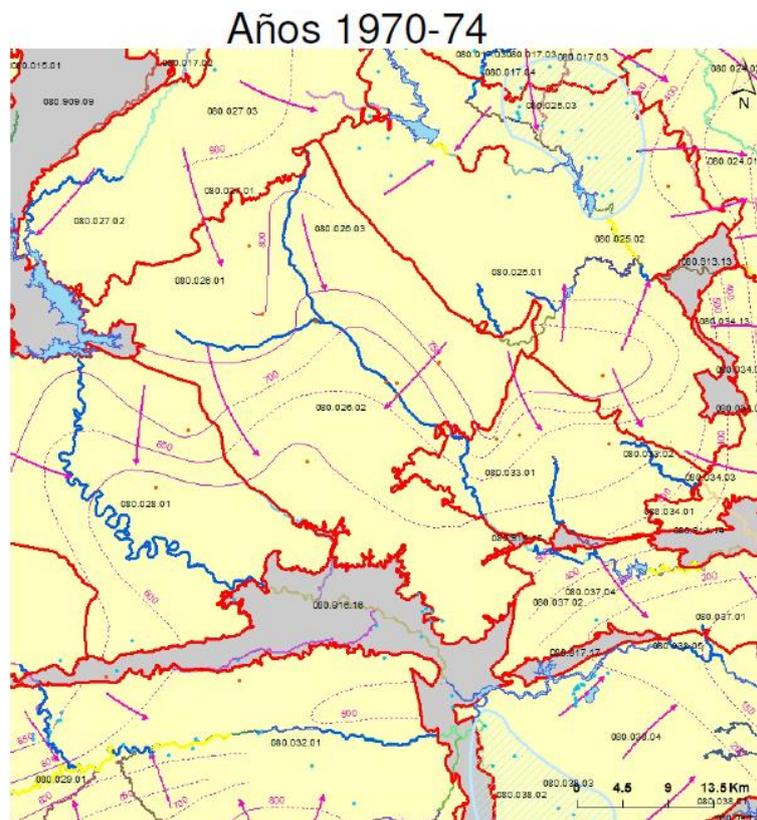
Sin embargo, en los últimos estudios realizados por la CHJ, estos flujos han cambiado de la siguiente manera:

- Mira: existe un flujo hacia Requena-Utiel de entre 3 y 5 hm³/año.
- Las Serranías: no hay intercambio de flujo.
- Buñol-Cheste: la transferencia de flujo desde Cabrillas-Malacara ha aumentado hasta unos 24 hm³/año.
- Hoces de Cabriel: sin intercambio.

En referencia a los cauces superficiales, sólo se tendrán en cuenta el río Magro y sus afluentes el río Madre y la Rambla de la Torre, en la masa de Requena-Utiel, y el río Buñol, en Cabrillas-Malacara, que, a partir de la información de IGME-DGA (2011), serán ganadores respecto a las masas de agua subterránea.

Con la intención de conocer el comportamiento del sistema se dispone de mapas piezométricos, que pueden verse en la ilustración 22, elaborados por la Confederación Hidrográfica del Júcar que describen el flujo de agua subterránea en la zona de estudio y sus alrededores.

A partir de estos mapas se puede conocer, en parte, la evolución de estos flujos, ya que existe un gran desconocimiento de éstos.



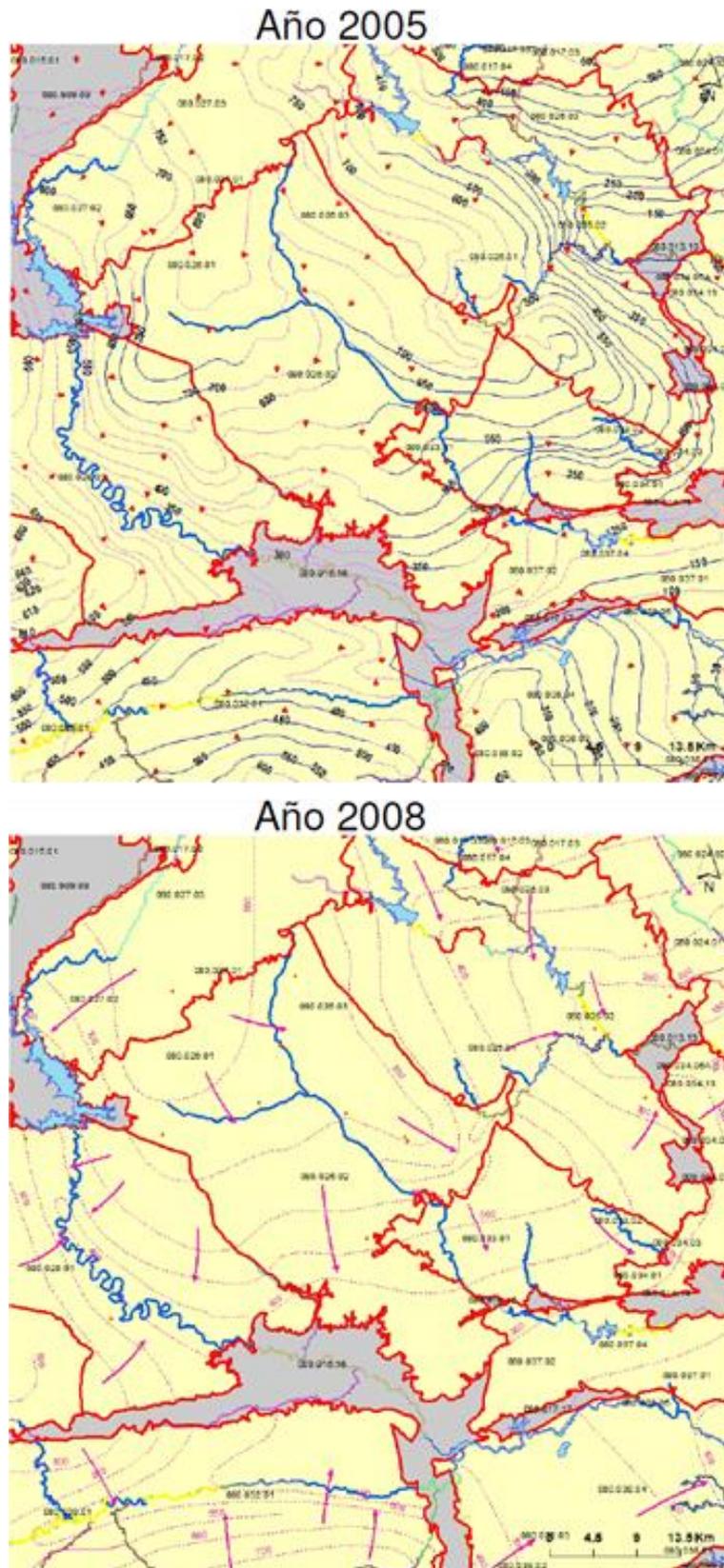


Ilustración 22. Mapas piezométricos de los años 1970/1974, 2005 y 2008.

Por último, la principal salida de agua del sistema se debe a la ya comentada sobreexplotación de la zona de Requena-Utiel que se manifiesta mediante pozos de extracción.

Para mostrar gráficamente las interrelaciones entre los diferentes elementos y las masas de agua subterránea que forman el sistema descritas en este apartado, en la ilustración 23 se muestra el esquema que define el modelo conceptual.

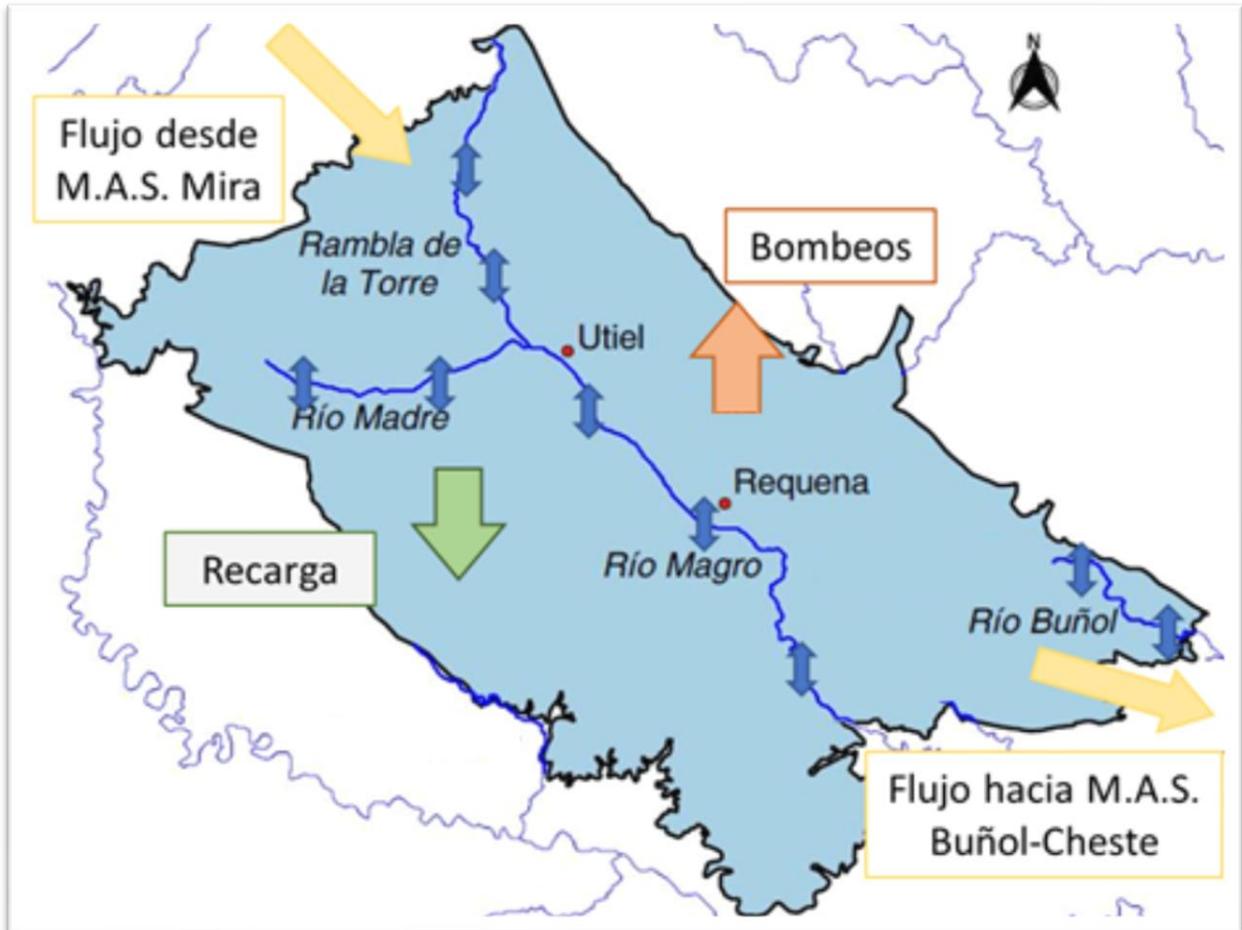


Ilustración 23. Modelo conceptual.



Modelo matemático del flujo de agua subterránea de los
acuíferos de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara (Valencia)



3.- Selección del código

La elección del código trata de la selección de las ecuaciones que gobiernan el fenómeno sobre el que se quiere obtener información y un código que las resuelva. Este código puede ser uno específicamente escrito o uno ya disponible (como es este caso).

En este punto se describirá el código escogido para la realización del modelo numérico en el que se desarrollará el caso de estudio.

3.1.- Código y modelo matemático

Para la elaboración del modelo se ha decidido utilizar el código MODFLOW, documentado originalmente por McDonald y Harbaugh en 1984, el cual simula el flujo de agua subterránea en medio poroso resolviendo las ecuaciones que rigen este problema mediante diferencias finitas.

La versión utilizada es MODFLOW-2005, que supone la cuarta versión del software después de MODFLOW-88, MODFLOW-96 y MODFLOW-2000.

Para ello, MODFLOW se apoya ModelMuse, cuya primera versión surgió en el año 2006, una interfaz gráfica de usuario para los modelos MODFLOW-2005, LGR, -LGR2, -NWT, -CFP, -OWHM, MODPATH, ZONEBUDGET, PHAST, SUTRA y MT3DMS elaborados por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Las fuentes del programa son de dominio público y puede descargarse desde la página web de este organismo.

Destacar de los modelos nombrados anteriormente MODPATH, un modelo de seguimiento de partículas para MODFLOW; PHAST, simulación de flujo de agua subterránea, transporte de solutos y reacciones geoquímicas de múltiples componentes; SUTRA, simulación de flujo de agua con densidad variable y transporte de solutos o energía en medio saturado o no saturado; y ZONEBUDGET, programa para calcular balances de masa a nivel subregional en modelos de agua subterránea con MODFLOW, y que también se utilizará más adelante.

MODFLOW resuelve la ecuación del flujo de agua subterránea, a partir de la cual se describe matemáticamente el movimiento en 3D del agua subterránea en un medio poroso saturado, homogéneo y anisótropo en régimen transitorio:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) + W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$

Donde K_x , K_y , K_z son las componentes de la conductividad hidráulica en las direcciones x , y , z , respectivamente, en unidades de L/T; h es la altura piezométrica (L), W es un flujo volumétrico por unidad de volumen y se utiliza para representar fuentes y sumideros (1/T); S_s es el almacenamiento específico (1/L); y t es el tiempo, en unidades de T.

Para la resolución de esta ecuación será necesario agregarle las condiciones inicial y de contorno, que se hará durante el diseño del modelo.

A partir de la resolución de la ecuación del flujo y las condiciones inicial y de contorno que se hayan definido, podrá conocerse la altura piezométrica en función del espacio y del tiempo.

Como ya se ha comentado, MODFLOW se basa en el método de las diferencias finitas para encontrar una solución a la ecuación del flujo. Para ello, se ha de discretizar la región en un número finito de celdas, y las derivadas parciales son reemplazadas por diferentes entre los valores de las variables de esos puntos, convirtiendo el problema en un sistema de ecuaciones lineales cuya solución son los valores de la altura piezométrica para los puntos en el espacio y tiempo para los cuales se ha discretizado el sistema.

4.- Implementación del modelo

En este apartado se describirá la metodología para implementar todos los datos expuestos anteriormente en MODFLOW, así como los diferentes paquetes en los que éste se apoya y cómo introducirlos en el modelo.

Los tipos de archivo que se utilizarán para la implementación de datos son principalmente: xlsx, tablas de datos creadas en cualquier hoja de cálculo; shp, para introducir entidades geométricas (estos archivos se han generado a partir de Sistemas de Información Geográfica); y asc, que contienen datos ráster, es decir, aporta a cada celda un valor que representa una información de la realidad.

4.1.- Discretización espacio-temporal y diseño de la malla

4.1.1.- Diseño de la malla

A partir de los datos obtenidos en SIG, se importa el archivo “shapefile” en ModelMuse que demarcará los límites horizontales del modelo creando un objeto. Este objeto se configura de manera que esté discretizado en celdas de tamaño 500 x 500 m² cada una de ellas, suponiendo una malla de 127 columnas y 99 filas (Ilustración 24).

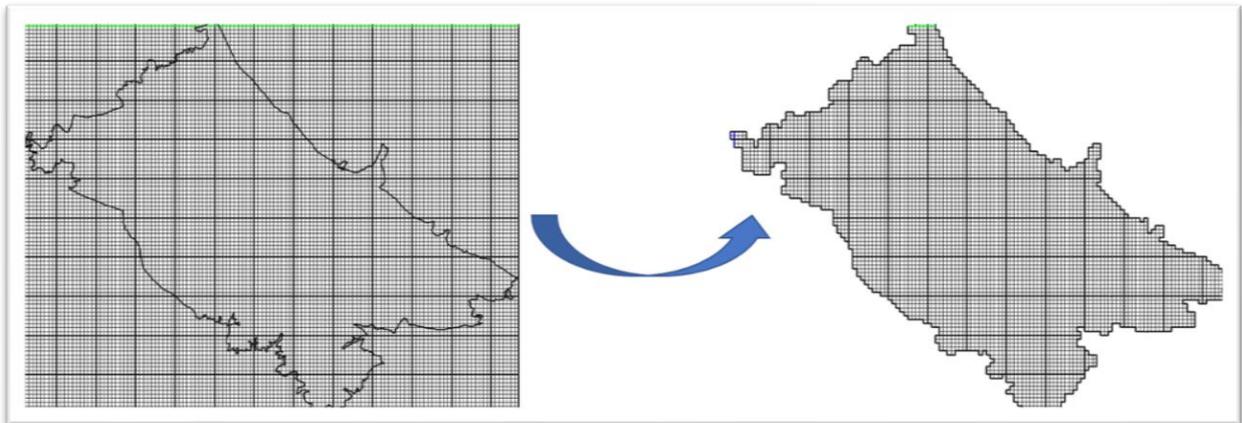


Ilustración 24. Discretización horizontal del modelo.

En cuanto a la discretización vertical, el sistema se compone de tres capas. Estas tres capas se introducen en el modelo importando archivos asc que definen para cada una de las celdas una cota.

Para definir las tres capas, se aportan los datos de cotas del techo y de la base de la capa superior, de la base de la capa intermedia, y de la base de la capa inferior. Cabe recordar que bajo la capa inferior se encuentra un estrato impermeable.

Una vez establecidos los límites verticales es necesario configurarlos. Las capas pueden ser:

- Confinada: funciona como confinada.
- Convertible: se considera confinada o libre según la superficie piezométrica se encuentre por debajo o por encima del techo de la misma.
- No simulada: no se simula.

Todas las capas serán convertibles a excepción de la inferior, que será confinada.

4.1.2.- Discretización temporal

En cuanto a la discretización temporal, el periodo de simulación estará comprendido entre el año hidrológico 1979/80 y 2015/16. El modelo se calculará en régimen influenciado (transitorio), ya que el periodo estudiado empieza en la época en la que la masa de agua comenzó a ser explotada. Por lo que los valores son dependientes del tiempo.

En el modelo se trabajará a escala mensual. Puesto que el periodo de simulación consta de 36 años, habrá un total de 432 meses. Por tanto, todos los parámetros que se incluyan en el modelo y sean dependientes del tiempo deberán tener 432 valores.

4.2.- Condiciones de contorno

A través de las condiciones de contorno se informa al modelo matemático acerca de las interacciones entre las masas de agua subterránea y el medio exterior.

Existen tres tipos de condiciones de contorno en un modelo de flujo:

- Condición de Dirichlet, de primer tipo o de borde con un potencial o altura piezométrica prescrita.

Esta condición puede escribirse matemáticamente de la siguiente manera:

$$h(x, y, z, t) = f_1(x, y, z, t) \text{ sobre } \Gamma_1, \text{ para } t > 0$$

donde $f_1(x, y, z, t)$ es una función conocida y Γ_1 el borde considerado.

Esta condición resulta útil cuando la masa de agua subterránea está en contacto con un cuerpo de agua superficial que impone su altura al contorno.

- Condición de Neumann, de segundo tipo, de borde con un gradiente de la altura piezométrica prescrito o de borde con un flujo prescrito.

Puede escribirse matemáticamente de la siguiente manera:

$$q_n = f_2(x, y, z, t) \text{ sobre } \Gamma_2, \text{ para } t > 0$$



donde q_n es la componente normal del flujo al borde Γ_2 , y f_2 una función conocida.

Se utiliza, por ejemplo, en bordes impermeables, donde el flujo prescrito es igual a 0.

- Condición de Cauchy, de tercer tipo o de borde semipermeable. También conocida como condición mixta, ya que resulta de una combinación de las dos anteriores.

4.2.1.- Límites laterales

Tal y como se explicó anteriormente, se considerará todo el borde como impermeable a excepción de los límites con la masa de agua subterránea de Mira y la de Buñol-Cheste.

No es necesario realizar ninguna acción adicional para que el modelo considere el borde como impermeable, ya que en el momento de discretizar la malla horizontalmente, el modelo considera todos los bordes como impermeables por defecto.

Para introducir las condiciones de contorno impuestas en los límites laterales en los que existe una circulación de flujo, habrá de activarse el paquete GHB (General-Head Boundary) de MODFLOW, el cual simula la entrada o salida de un flujo a o desde una celda del modelo desde o hacia una fuente externa.

Esta condición de contorno es de tipo 3, ya que el flujo depende de la altura piezométrica.

Este flujo es proporcional a la diferencia de alturas entre la celda y la asignada a la fuente externa, por lo que, asumiendo una relación lineal entre el flujo y la altura, se tiene:

$$Q_{b_{i,j,k}} = C_{b_{i,j,k}}(h_{b_{i,j,k}} - h_{i,j,k})$$

siendo $Q_{b_{i,j,k}}$ el flujo en la celda i,j,k a partir de la fuente; $C_{b_{i,j,k}}$ es la conductancia entre la fuente externa y la celda i,j,k ; $h_{b_{i,j,k}}$ es la altura asignada a la fuente externa; y es la altura en la celda i,j,k .

Los parámetros que el paquete solicita son:

- Starting time: inicio del periodo de simulación.

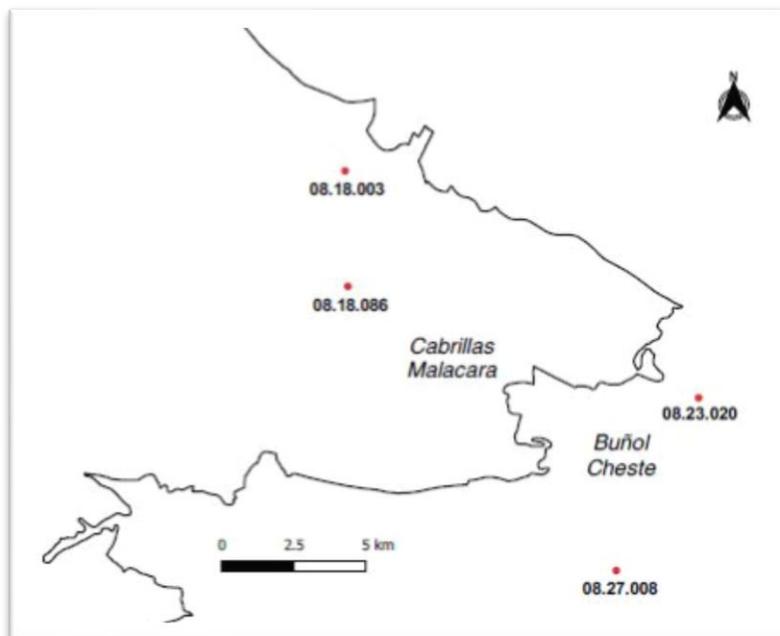
- Ending time: final del periodo de simulación.
- Boundary head: altura de referencia de la fuente o sumidero externo.
- Conductance: conductancia de los materiales entre la fuente o sumidero externo y el dominio del modelo.

El proceso para introducir esta información es el siguiente:

1. En primer lugar, es necesario activar el paquete GHB para poder utilizarla.
2. Se crea un objeto que represente el contorno. En este caso se dibuja una polilínea que pase por las celdas que forman el borde.
3. Enlazado del objeto creado con el paquete. En este paso se le atribuyen al objeto los parámetros que lo definen.

Estos datos se recogen en una hoja de cálculo de manera que se puedan implementar directamente en la venta de introducción de datos del paquete GHB.

En el caso del límite con la masa de Buñol-Cheste (Ilustración 25), solo existen 4 piezómetros relativamente cercanos de los que no puede extraerse demasiada información, por lo que la altura piezométrica se considerará constante a lo largo de todo el borde, con un valor de 300 m de altura.



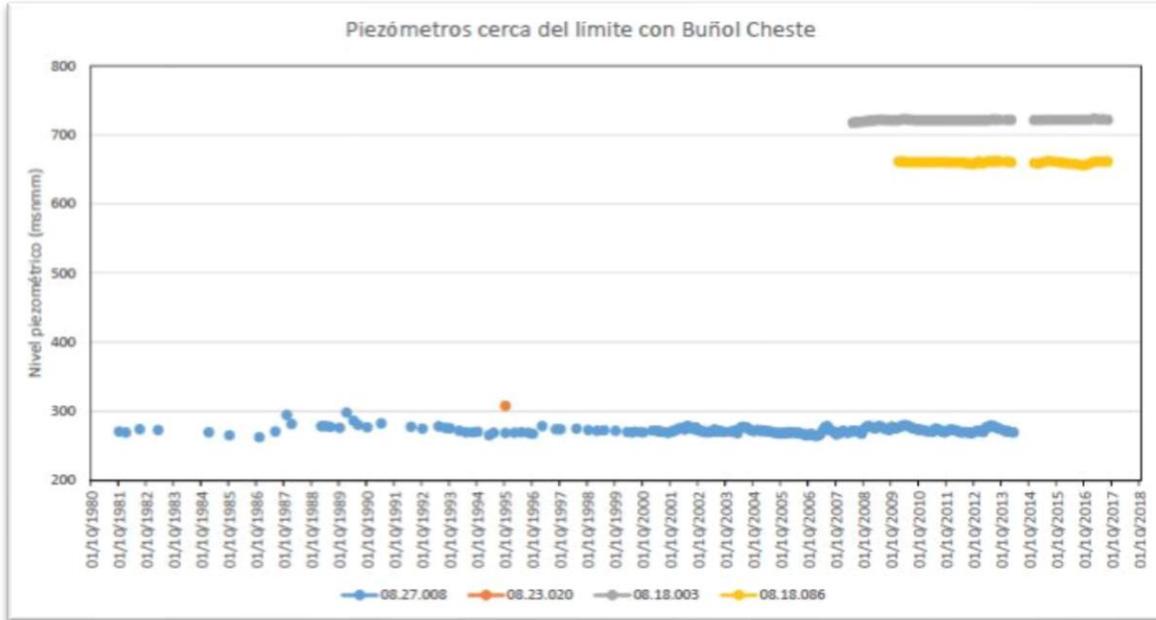
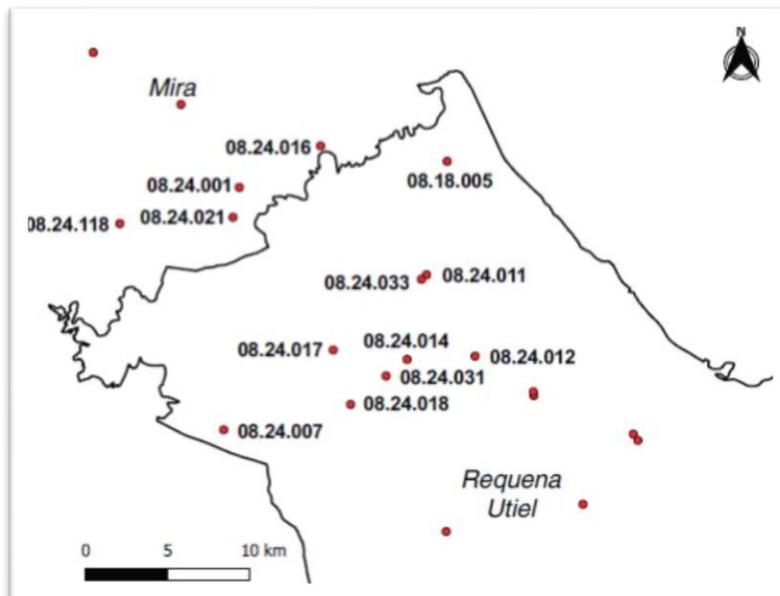


Ilustración 25. Arriba, piezómetros próximos al límite con la masa Buñol-Cheste; abajo, los valores de esos piezómetros.

En el caso del límite con la masa de Mira (Ilustración 26) existe más información gracias a la cantidad de piezómetros próximos a la zona. A partir de ellos se ha estimado la altura en varias celdas del borde (Ilustración 27). Para extenderlos a todo el límite, ModelMuse interpolará estos valores fijados.



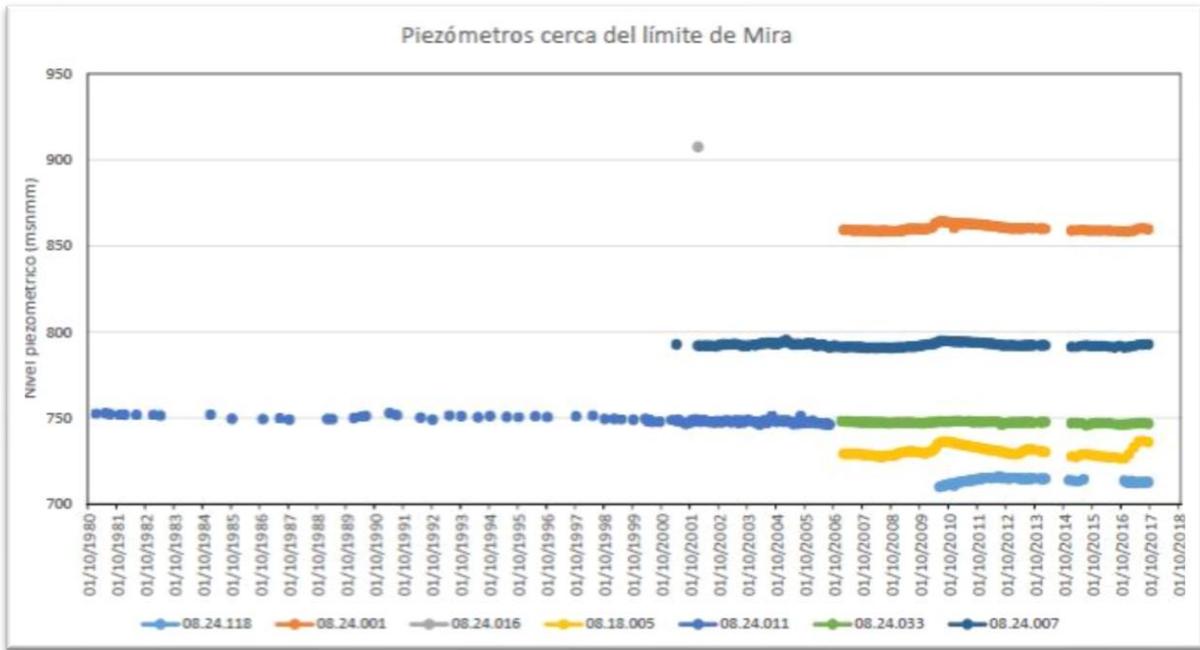


Ilustración 26. A la izquierda, piezómetros próximos al límite con la masa de Mira; a la derecha los valores de esos piezómetros.

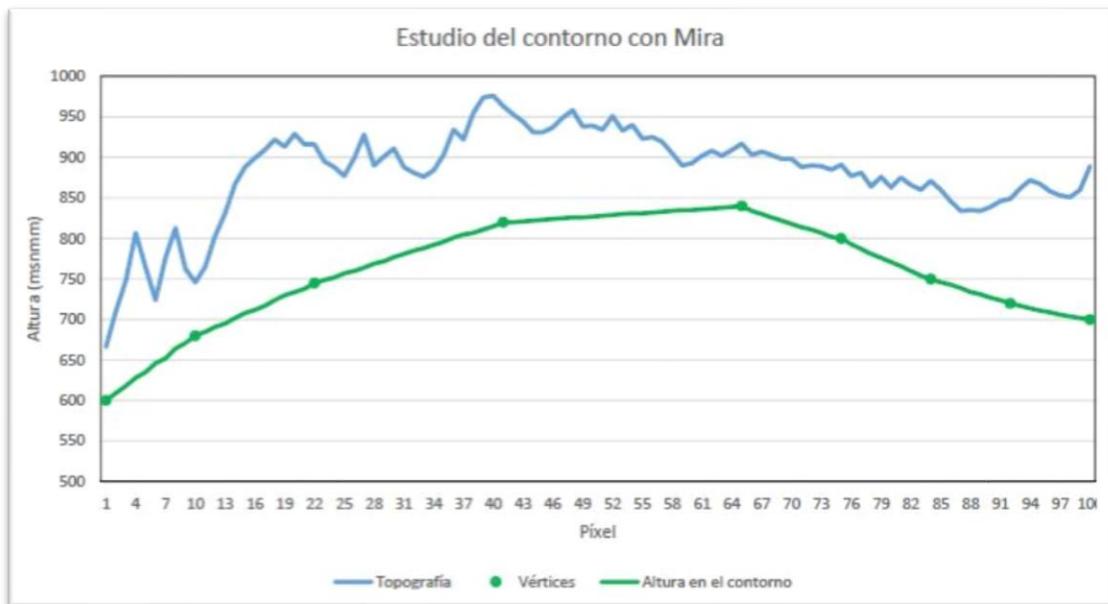


Ilustración 27. Valores de la altura piezométrica en el contorno a partir de los vértices.

Generalmente se conoce el flujo y la altura, por lo que la conductancia es un parámetro a calibrar.

4.2.2.- Cauces superficiales.

Los ríos que se tendrán en cuenta en el modelo son el río Magro y sus afluentes: el río Madre y la rambla de la Torre y el río Buñol (Ilustración 28).



Se simularán como un contorno de tipo 3, en el que el flujo es dependiente de la altura piezométrica.

En este caso, se habrá de utilizar el paquete RIV, el cual simula las relaciones entre las aguas superficiales y las aguas subterráneas en el caso de que algún cauce superficial se encuentre conectado con un acuífero.

Para llevar a cabo la simulación, el río se divide en tramos según la discretización del modelo, estando contenido cada uno de estos tramos en una sola celda. Se simula la relación entre cada tramo y la celda que lo contiene.

El flujo entre el río y el acuífero viene dado por la expresión:

$$Q_{RIV} = C_{RIV}(H_{RIV} - h_{i,j,k})$$

donde Q_{RIV} es el flujo entre el río y el acuífero, siendo positivo si entra en el acuífero, H_{RIV} es la altura de agua en el río, C_{RIV} es la conductancia de la zona de interconexión río-acuífero, y $h_{i,j,k}$ es la altura piezométrica en el nodo de la celda subyacente al tramo de río considerado.

Si el lecho del río permanece saturado, siendo la cota del lecho R_{BOT} , entonces el flujo es:

$$Q_{RIV} = C_{RIV}(H_{RIV} - R_{BOT})$$

Los parámetros que el paquete solicita son:

- Starting time: inicio del periodo de simulación.
- Ending time: final del periodo de simulación.
- River stage: altura de agua en el río.
- Conductance: conductancia de los materiales del lecho del río.
- River bottom: cota del lecho del río.

Para introducir los ríos en el modelo habrá que seguir el siguiente procedimiento:

- En primer lugar, habrá que importar los puntos que definen el trazado de cada río. Cada punto representa una celda y estará ligada a una cota, que será la cota del lecho del río
- A cada uno de estos puntos habrá que asignarle los parámetros anteriormente definidos.

En todos los ríos, la altura de agua se considerará 1 m por encima de la cota del lecho.

También se ha considerado como constante la conductividad en cada tramo.

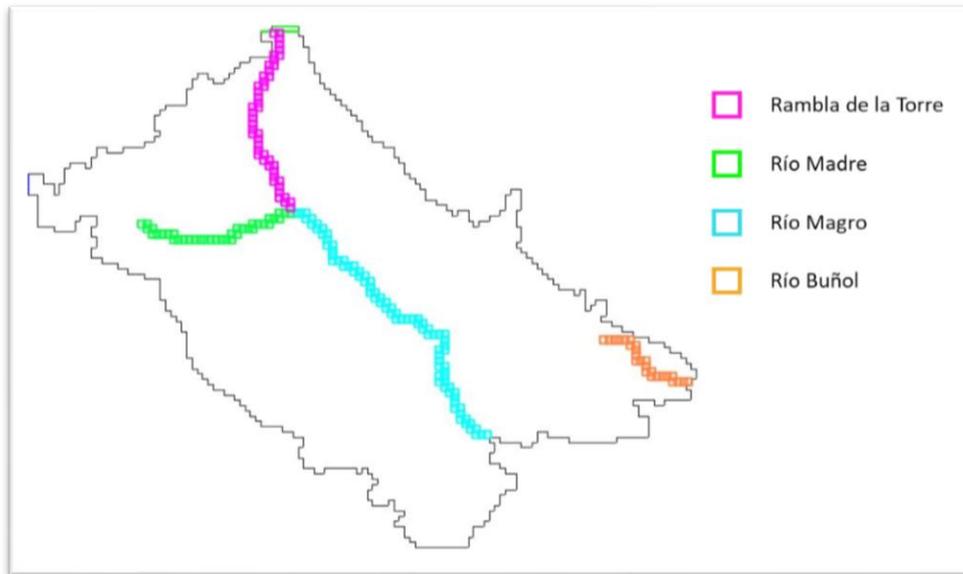


Ilustración 28. Representación de los cauces superficiales tenidos en cuenta en el modelo.

4.2.3.- Recarga por infiltración

La recarga es la entrada neta de agua en el terreno, entendiendo ésta como la infiltración menos evaporación menos escorrentía subsuperficial, que se transmite hasta los acuíferos.

En este caso, se introducirá como un contorno de tipo 2, ya que el flujo es prescrito.

Se tendrá en cuenta tanto la recarga por precipitación, que tendrá una importancia mucho mayor, como la recarga por retornos de riego.

La recarga se incorpora en MODFLOW a través del paquete RCH, y se expresa de la siguiente manera:

$$Q_{r_{i,j}} = I_{i,j} DELR_j DELC_i$$

donde $Q_{r_{i,j}}$ es la recarga aplicada a la celda horizontal de localización i,j , en L^3/T ; $I_{i,j}$ es la tasa de recarga, en L/T ; y $DELR_j DELC_i$ es el área horizontal de la celda, L^2 .

MODFLOW permite elegir entre tres opciones para seleccionar la celda de cada columna que recibirá la recarga en cuestión:

1. Aplicación de la recarga a celdas del primer estrato del modelo.
2. Aplicación de la recarga a cualquier celda de una columna vertical.

3. Aplicación de la recarga a la celda activa más alta de una columna vertical.

En este caso se ha utilizado la tercera opción, aplicándose sobre la celda superior que esté activa.

Para la recarga por precipitación, se utilizará como ya se comentó anteriormente la zonificación (Ilustración 29) utilizada en el modelo PATRICAL (Pérez-Martín, 2005).

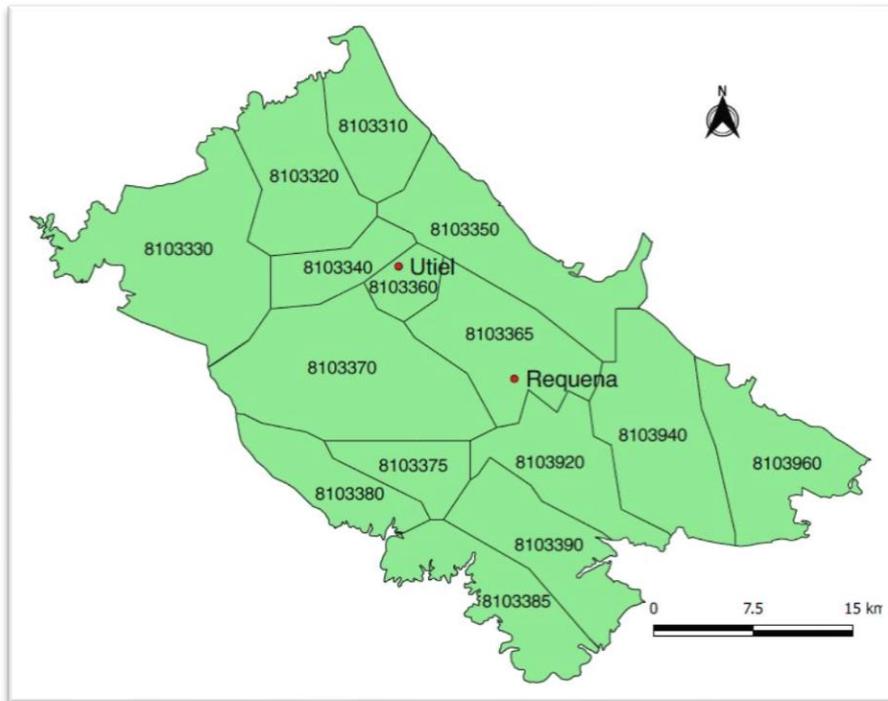


Ilustración 29. Zonificación basada en el modelo PATRICAL (Pérez-Martín, 2005).

Respecto a la recarga por retornos, la zonificación está basada siguiendo la distribución de las unidades de demanda agrícola (Ilustración 30), que son: Hoya de Buñol y Chiva, pequeños regadíos del Valle de Ayora, Regadíos de la Serranía de Valencia, riegos del Alto Magro y riegos mixtos de la Plana de Utiel.

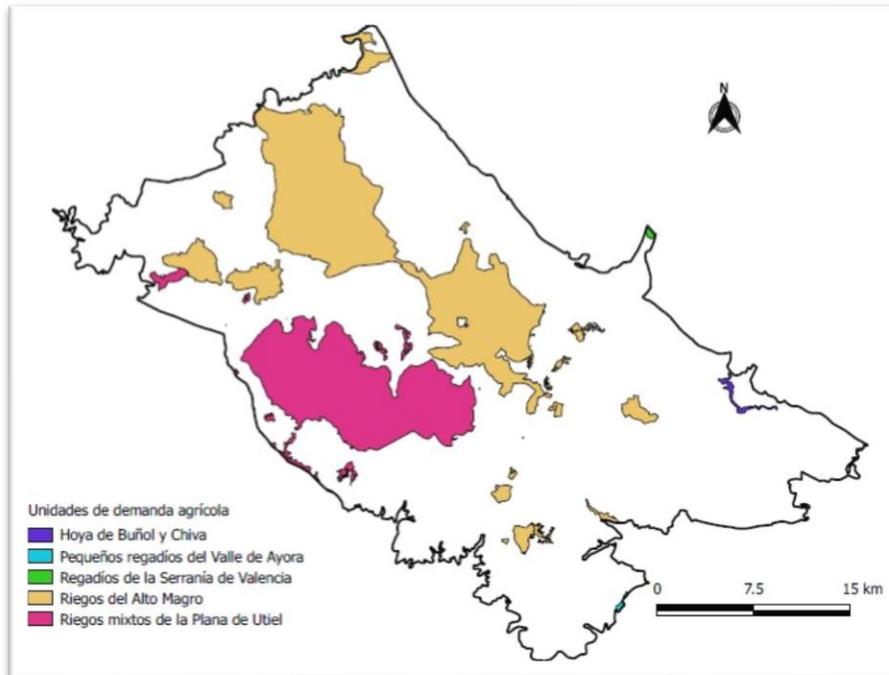


Ilustración 30. Zonificación de la recarga por retornos de riego.

En este modelo no se tendrán en cuenta los regadíos de la Serranía de Valencia y los pequeños regadíos del Valle de Ayora.

La información requerida para implementar la recarga es:

- Starting time: inicio del periodo durante el cual se produce la recarga.
- Ending time: final del periodo durante el cual se produce la recarga.
- Recharge rate: tasa de recarga durante el periodo de tiempo antes configurado.

Para introducirla se seguirá el mismo procedimiento tanto para un caso como para el otro:

1. Activar el paquete RCH de MODFLOW.
2. Definir las zonas de recarga, para lo que se utilizará archivos tipo shapefile
3. Asignar los valores que previamente se han recopilado en una hoja de cálculo.
Este paso habrá de realizarse tantas veces como zonas se hayan considerado.

4.3.- Condición inicial

Para que la ecuación diferencial del flujo de agua en un medio poroso converja en una solución, es necesario asociar a la misma, además de las condiciones de contorno, una condición inicial.



La condición inicial describe los valores de la altura piezométrica para un tiempo considerado inicial ($t=0$) y, de forma general, se escribe:

$$h(x, y, z, 0) = f_0(x, y, z) \text{ sobre } A$$

siendo $f_0(x, y, z)$ una función conocida que indica la distribución de la altura piezométrica h y A el dominio del acuífero.

Algunos criterios para seleccionar estas alturas pueden ser:

- Que estén dentro del rango de la solución.
- Considerarlas relativas a la topografía.
- Que estén por encima de la base del modelo.
- En modelos 3D, que estén por encima de la base de la capa superior.
- Considerarlas relativas a las condiciones de contorno impuestas.

Para encontrar una solución se necesitarán menos iteraciones cuanto más cerca estén las alturas iniciales de las finales.

Debido a la falta de información acerca del nivel piezométrico en la fecha de inicio de la simulación (1980), se ha tomado como condición inicial que la altura piezométrica de cada celda se encuentre un metro por encima de la base de la capa superior.

4.4.- Parámetros hidrogeológicos

La ecuación que gobierna el flujo de agua subterránea en un medio poroso incluye una variable dependiente que es la altura piezométrica, unas variables independientes que son las coordenadas espaciales y el tiempo, y unos parámetros.

Estos parámetros pueden ser hidrológicos, como la recarga y los bombeos, o de las propiedades de los materiales, los cuales describen características hidráulicas del medio poroso.

Para encontrar una solución en el modelo matemático, cada una de las celdas deberán tener asignados valores de estos parámetros.

Es complicado asignar valores iniciales al modelo, ya que un conocimiento completo del terreno mediante medidas de campo y/o laboratorio conlleva un gran consumo de recursos, por lo que las medidas que se conocen están disponibles en muy pocas localizaciones.

A partir de los escasos datos recopilados en campo, se pueden utilizar dos métodos para extender las medidas disponibles a toda el área de interés:

- Zonación: el dominio modelado es dividido en partes dentro de las cuales un parámetro es constante, por lo que los cambios de valores de parámetros solo se dan de una zona a otra.
- Interpolación: este método estima un valor para cada celda donde no se conocen datos, en función de los valores registrados. Permite tener en cuenta cierta variabilidad de los valores en el espacio.

Para la creación de este modelo se ha utilizado el primer método.

Los parámetros a introducir son la conductividad hidráulica, el almacenamiento específico y el rendimiento específico.

La zonificación para los parámetros se ha realizado tomando de base el modelo llevado a cabo por Fernández-Urizar (2017), *Modelación matemática del flujo de agua subterránea del acuífero de Requena-Utiel. Estudio del plan de explotación de la masa de agua*, el cual se fundamenta en los datos hidrogeológicos anteriormente expuestos aquí aportados por el MAGNA y el IGME (Ilustración 31).

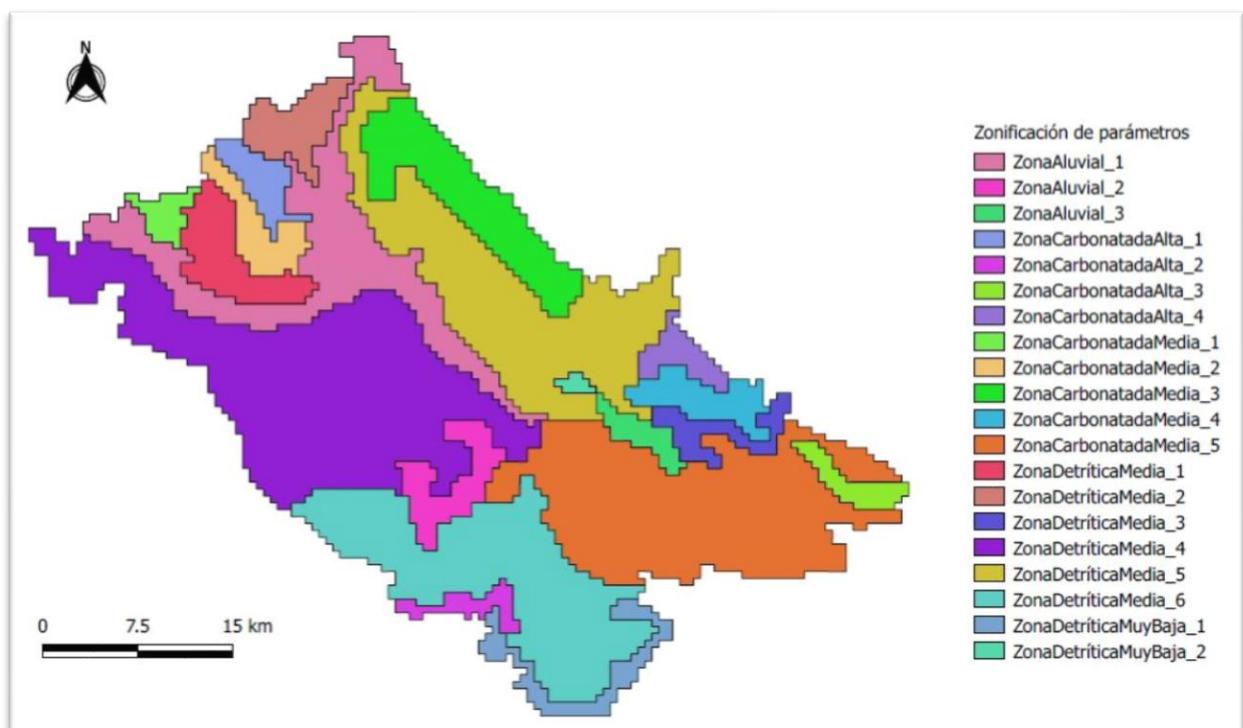


Ilustración 31. Zonificación para los parámetros basada en el modelo de Fernández-Urazi, (2017).



La conductividad hidráulica es el parámetro que más influencia tiene sobre el flujo de agua subterránea. Es común en estados preliminares de la modelación suponer un medio homogéneo e isótropo, utilizando un único valor de K para todo el acuífero.

En este caso se asumirá isotropía horizontal, de manera que $K_x = K_y$, y la conductividad vertical se asumirá como una décima parte de la conductividad horizontal, siendo $K_z = \frac{1}{10} K_x$. Estos valores también podrán variar entre capas de una misma zona.

En cuanto al rendimiento específico y al almacenamiento específico, el primero será requerido cuando la capa es libre, mientras que el segundo lo será cuando la capa sea confinada. Si la capa es convertible deberán especificarse ambos parámetros.

Como el sistema está compuesto por varias capas, solo aquella que contenga el nivel freático será libre, por lo que las demás funcionarán como confinadas, utilizando el almacenamiento específico.

Para introducir todos estos parámetros habrá que seguir los siguientes pasos:

1. Se generan las 20 zonas mediante un archivo de tipo shapefile que contiene definidas todas ellas, cada una como un objeto diferente.
2. Se accede a la pestaña de datos hidrológicos de uno de estos objetos y se le asignan los valores de K_x , S_s y S_y . Como estos valores pueden variar dependiendo de la capa en la que se encuentren, se introducen a partir de una función que asigna un valor distinto según la capa. Por otra parte, los valores de K_y y K_z se introducirán como funciones dependientes de K_x .

Este paso se habrá de seguir para cada una de las zonas definidas.

En la tabla 2 se pueden ver los valores de los parámetros hidrogeológicos para cada zona y en cada capa:

Zona	K_x			S_s			S_y		
	Capa			Capa			Capa		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ZonaAluvial_1	7.3	7.3	7.0	0.01	0.01	0.0001	0.3	0.3	0.3
ZonaAluvial_2	9.0	9.0	8.0	0.01	0.01	0.0001	0.3	0.3	0.3
ZonaAluvial_3	6.0	6.0	4.0	0.01	0.01	0.0001	0.3	0.3	0.3
ZonaCarbonatadaAlta_1	6.0	6.0	4.0	0.02	0.02	0.0005	0.2	0.2	0.2
ZonaCarbonatadaAlta_2	4.0	4.0	3.0	0.02	0.02	0.0005	0.2	0.2	0.2

ZonaCarbonatadaAlta_3	2.0	1.0	0.8	0.02	0.02	0.0005	0.2	0.2	0.2
ZonaCarbonatadaAlta_4	2.0	1.0	0.8	0.02	0.02	0.0005	0.2	0.2	0.2
ZonaCarbonatadaMedia_1	5.0	5.0	3.0	0.01	0.01	0.00005	0.15	0.15	0.15
ZonaCarbonatadaMedia_2	5.0	5.0	4.0	0.01	0.01	0.00005	0.15	0.15	0.15
ZonaCarbonatadaMedia_3	0.1	0.1	0.09	0.01	0.01	0.00005	0.15	0.15	0.15
ZonaCarbonatadaMedia_4	0.05	0.05	0.03	0.01	0.01	0.00005	0.15	0.15	0.15
ZonaCarbonatadaMedia_5	0.7	0.7	0.6	0.01	0.01	0.00005	0.15	0.15	0.15
ZonaDetríticaMedia_1	5.0	5.0	4.0	0.05	0.05	0.0001	0.2	0.2	0.2
ZonaDetríticaMedia_2	0.3	0.3	0.2	0.05	0.05	0.0001	0.2	0.2	0.2
ZonaDetríticaMedia_3	0.02	0.02	0.009	0.05	0.05	0.0001	0.2	0.2	0.2
ZonaDetríticaMedia_4	0.14	0.14	0.13	0.05	0.05	0.0001	0.2	0.2	0.2
ZonaDetríticaMedia_5	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.0001	0.2	0.2	0.2
ZonaDetríticaMedia_6	0.5	0.5	0.4	0.05	0.05	0.0001	0.2	0.2	0.2
ZonaDetríticaMuyBaja_1	0.1	0.1	0.08	0.01	0.01	0.00001	0.1	0.1	0.1
ZonaDetríticaMuyBaja_2	0.1	0.08	0.06	0.01	0.01	0.00001	0.1	0.1	0.1

Tabla 2. Valores de los parámetros hidrogeológicos de cada una de las zonas, por capa.

4.5.- Bombeos

Los pozos son perforaciones verticales, generalmente con forma cilíndrica y de diámetro mucho menor que la profundidad, mediante los cuales se extrae el agua de los acuíferos.

En MODFLOW los pozos se gestionan mediante el paquete WEL, el cual simula pozos que inyectan (valores positivos) o extraen (valores negativos) agua en un acuífero.

Se implementan especificando su posición en el espacio (celda en la que se ubica) y el caudal Q que éste agrega o quita al acuífero durante cada periodo de acción simulado.

En el caso de este trabajo todos los pozos son de bombeo, por lo que suponen una extracción de agua de las masas subterráneas.

Los pozos se introducen en ModelMuse mediante objetos y se simulan como un contorno de tipo 2 (flujo prescrito). La información que se requiere para introducirlos es:

- Starting time: inicio del periodo de tiempo durante el cual se produce la extracción.
- Ending time: final del periodo de tiempo durante el cual se produce la extracción.
- Pumping rate: tasa de bombeo durante el periodo de simulación configurado.

Esta información se prepara previamente en una hoja de cálculo que permite introducir directamente los datos en ModelMuse. Se clasificarán los pozos según el tipo de demanda que satisfacen y según la masa de agua subterránea en la que se encuentren, por lo que habrá un total de 6 hojas.

La introducción de los pozos de bombeo se realiza de la siguiente manera:

1. Activar el paquete de pozos WEL
2. Crear los objetos que representen los pozos y asignarles los valores de tasa de bombeo. Los pozos se introducirán como puntos. En la ventana de configuración de los puntos se identifican como pozos y en la pestaña de datos se copian todos los datos desde una hoja de cálculo. Si la hoja de cálculo está debidamente organizada, se pueden añadir tantos pozos como se deseen a partir de las coordenadas de posición de cada uno y los datos que lo definen.

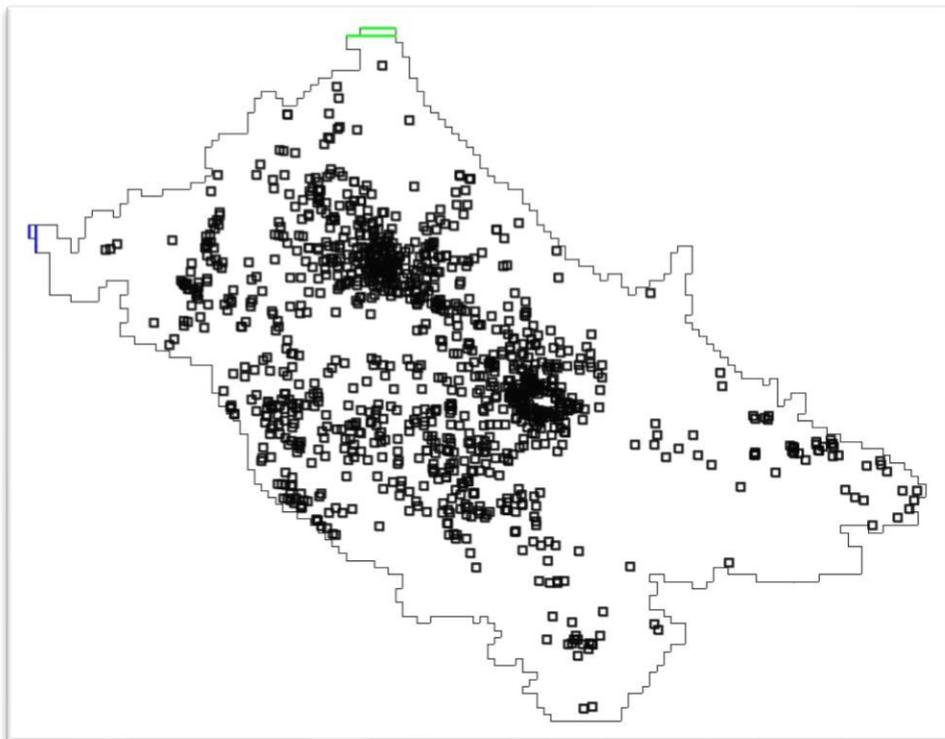


Ilustración 32. Representación de todos los pozos de bombeo en MODFLOW.



5.- Proceso de calibración y análisis de los resultados del modelo

El proceso más importante en la creación de un modelo matemático de este tipo es la calibración, ya que su propósito es el de reproducir datos registrados en la realidad.

La calibración consiste en encontrar un conjunto de valores de los parámetros hidrogeológicos, las condiciones de contorno y las acciones externas de manera que los datos de salida del modelo concuerden, con un margen de error preestablecido, con los valores conocidos para unas ciertas localizaciones, de manera que reproduzcan lo más fielmente posible la realidad.

En un modelo de flujo la variable a reproducir son las alturas piezométricas y en algunos casos puede ser interesante reproducir los flujos de la red de drenaje.

Puede hacerse en régimen estacionario y/o transitorio, y de forma manual o automática.

Como se expuso anteriormente, el modelo estará configurado en régimen transitorio, ya que el periodo de simulación comienza en concordancia al comienzo de la explotación de las masas subterráneas mediante pozos, por lo que es necesario conocer datos de alturas y/o flujos en función del tiempo.

La calibración se realizará de manera manual (Ilustración 33). Entre las principales diferencias respecto a la calibración automática son:

- Diferentes combinaciones de parámetros pueden producir similares configuraciones de alturas piezométricas.
- La inclusión de información acerca de los flujos puede disminuir el efecto de este problema.
- No es posible cuantificar la incertidumbre o la fiabilidad de los resultados.
- Los resultados están influenciados por el modelador.

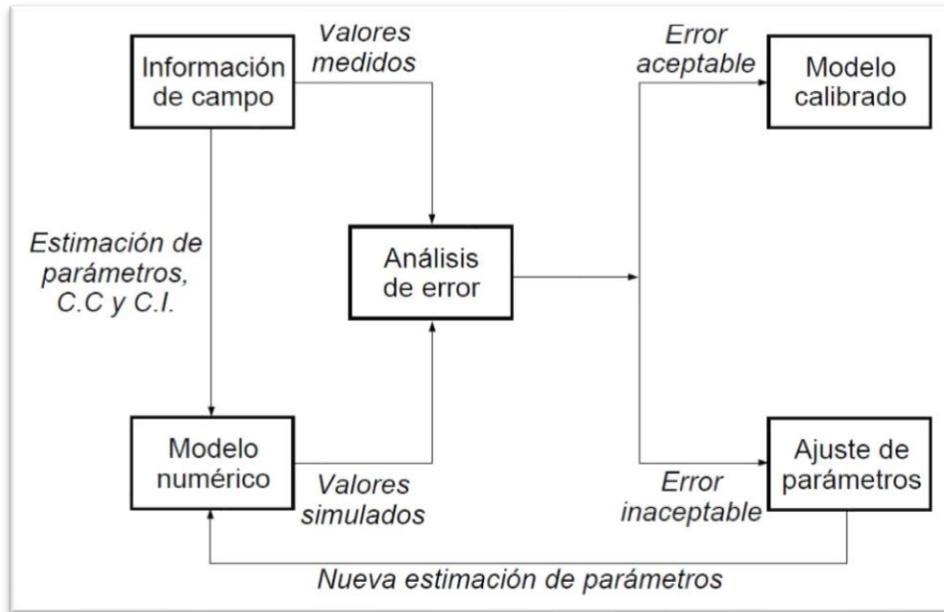


Ilustración 33. Esquema del procedimiento de la calibración manual.

El objetivo de calibración de este modelo es el de reproducir las series de niveles piezométricos observadas de ciertos piezómetros instalados en el área de estudio y de los que se dispone de información. Estos piezómetros (Ilustración 34), 10 en total, se encuentran repartidos de forma lo más homogénea posible a lo largo de ambas masas de agua subterránea,

Los piezómetros se introducen en MODFLOW utilizando el paquete HOB (Head Observation Package), y requieren la siguiente información:

- Time: tiempo correspondiente a la medida que se quiere calibrar.
- Observed Head: valor registrado de altura piezométrica.
- Statistic: necesario si se utiliza calibración automática (UCODE). No es este caso.
- StatFrat: necesario si se utiliza calibración automática (UCODE). No es este caso.

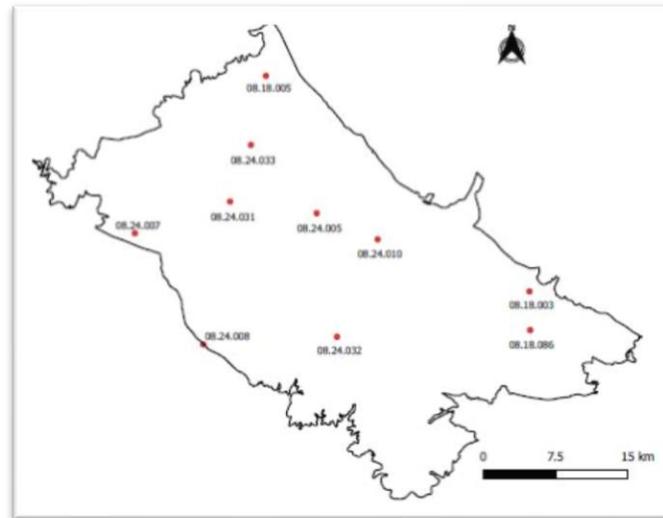


Ilustración 34. Piezómetros utilizados para la calibración del modelo

Para introducirlos se sigue el siguiente procedimiento:

1. Activar el paquete HOB.
2. Crear un objeto que represente el piezómetro. En este caso los pozos se crearán a través de puntos, introduciendo las coordenadas geográficas en las que se ubican.
3. Enlazar el objeto con el paquete. Se introducen los niveles piezométricos registrados en el punto que represente el pozo de observación correspondiente. Este paso debe ser repetido por cada pozo existente.

Antes de ejecutar el modelo, habrá que elegir el algoritmo en el que se basará MODFLOW a la hora de realizar la simulación y resolver la ecuación del flujo subterráneo. En este modelo se ha decidido utilizar DE4: Direct Solver package, para el que habrá de definirse algunos parámetros que influirán en el funcionamiento del algoritmo, entre ellos:

	Valor
Maximum number of iterations (ITMX)	5
Acceleration parameter (ACCL)	1
Head change closure criterion (HCLOSE)	1
Printout Interval (IPRD4)	1

Tabla 3. Valores de los parámetros del algoritmo de resolución.

5.1.- Ejecución del modelo y primeros resultados

Una vez se ha creado el modelo, es hora de ejecutarlo para las condiciones de contorno, acciones exteriores y parámetros impuestos.



Las salidas que se obtienen del modelo son la evolución de las alturas piezométricas a lo largo del tiempo y los flujos de agua para cada una de las celdas.

Para poder analizar más minuciosamente la solución a la que llega el modelo, es conveniente utilizar estos resultados para realizar un balance hidrogeológico, que puede ser:

- Balance global: para el que se hará uso del programa GWChart.
- Balance por zonas: requiere la utilización del programa ZoneBudget y luego GWChart.

Balance global

Las entradas y salidas a las masas de agua subterránea Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara del modelo y que incidirán en el balance son:

- Entradas:
 - Almacenamiento (agua traspasada del almacenamiento al acuífero, STORAGE)
 - Infiltración desde el cauce de un río (RIVER LEAKAGE)
 - Entrada lateral desde otras masas de agua subterránea (HEAD DEP BOUNDS)
 - Recarga por infiltración del agua de precipitación y retornos de riego (RECHARGE)
- Salidas:
 - Almacenamiento (agua traspasada del acuífero al almacenamiento, STORAGE)
 - Pozos de extracción (WELLS)
 - Infiltración hacia el cauce de un río (RIVER LEAKAGE)
 - Salida lateral hacia otras masas de agua subterránea (HEAD DEP BOUNDS)

Puesto que la simulación comprende 432 periodos de tiempo (los 432 meses que formarán parte de la simulación), se obtendrán 432 valores para cada una de estas entradas o salidas, correspondientes a cada uno de los meses.

Debido a que se está trabajando para un largo periodo de tiempo y con una gran cantidad de información, es complicada la interpretación de los resultados obtenidos



en la simulación, por lo que se recurre a programas externos a MODFLOW que son capaces de leer la información de salida del modelo y procesarla para facilitar su análisis.

Con este fin se hará uso de GWChart, que es un programa específico para el análisis gráfico de modelos hidrogeológicos, también desarrollado por el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS).

El objetivo de utilizar este software es el de obtener una representación visual de la evolución en el tiempo de los distintos componentes que forman parte del balance hidrogeológico.

Tras haber ejecutado el modelo, se importa un archivo .lst creado por MODFLOW que incluye toda la información de salida en GWChart. GWChart permite extraer esta información en un archivo de formato .txt configurado de tal manera que los datos son fácilmente importables a una hoja de cálculo.

La información que este archivo contiene son los flujos de entrada y salida a la masa subterránea de agua y la evolución del almacenamiento, mostrándose tanto de manera acumulada a través del tiempo como discriminada para cada periodo de esfuerzo.

La hoja de cálculo ha de estar previamente programada para que únicamente sea necesario copiar y pegar la información del archivo .txt creado por GWChart, y así tener todos los resultados del balance global organizados en filas y columnas. Dispondrá de diversas pestañas que se utilizan auxiliariamente para realizar los cálculos necesarios para mostrar gráficamente el balance hidrogeológico, entre ellos mostrar los resultados en unidades coherentes, en este caso $\text{hm}^3/\text{año}$, además de otras que disgregan el balance por las distintas acciones que lo caracterizan.

En la ilustración 35 puede observarse la representación de todas las entradas y salidas que se han obtenido como resultados de la simulación del modelo, donde Delta S es el cambio en el almacenamiento del acuífero. En la Tabla 4 se muestra resumido este balance en promedio anual.

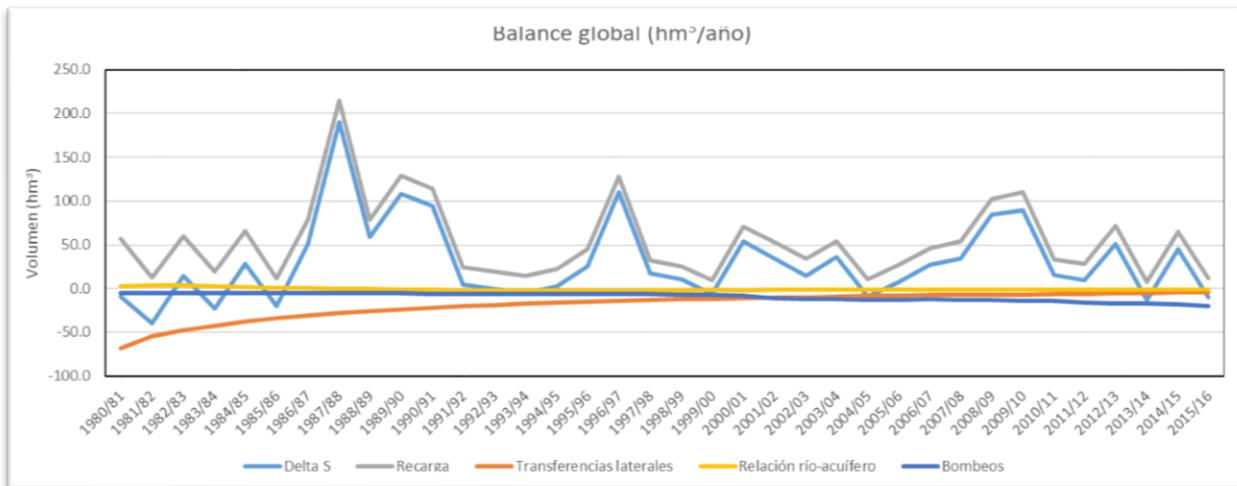


Ilustración 35. Balance global del sistema a lo largo del tiempo en $hm^3/año$.

Entradas		Salidas		Diferencias
Recarga	53.92			53.92
Otras masas	9.15	Otras masas	27.74	-18.59
Río acuífero	5.47	Acuífero río	6.36	-0.89
		Bombeos	9.52	-9.52
Total	68.54		43.72	24.82

Tabla 4. Promedio anual del balance hidrogeológico en $hm^3/año$.

Balance por zonas

Para poder llevar a cabo los balances por zonas será necesario hacer uso del programa ZoneBudget. Éste se encuentra integrado en GWChart, y también ha sido desarrollado por el USGS.

En primer lugar, será necesario activar en MODFLOW el paquete ZoneBudget y, posteriormente, definir las zonas del balance, que serán:

- Zona 1: Contorno de Mira
- Zona 2: Contorno con Buñol-Cheste
- Zona 3: Rambla de la Torre
- Zona 4: Río Madre
- Zona 5: Río Magro
- Zona 6: Río Buñol

Al tratarse de zonas que ya han sido creadas anteriormente como objetos (las dos primeras corresponden a los bordes permeables del sistema introducidas mediante polilíneas y las demás a tramos de cauces superficiales a partir de puntos) no será



necesario realizar ninguna acción para crearlas. Para asignarlas como zonas para el balance zonal simplemente habrá que entrar en sus propiedades, de la misma manera que para asignar los parámetros hidrogeológicos, donde aparecerá una opción de ZoneBudget, en la que se sólo se le habrá de dar un valor que represente la zona a la que hace referencia. Se ha de repetir este paso para las 6 zonas.

Al ejecutar el modelo tras haber habilitado el paquete ZoneBudget, se habrá de importar a GWChart, en la correspondiente sección Water Budgets, el archivo con formato .zblst, que se trata de un archivo con la misma estructura que el generado para el balance global específico para el balance zonal.

A partir de éste se exportará el archivo .txt que, de la misma manera que para el de balance global, permite copiar directamente la información en una hoja de cálculo, también preparada para ordenar los datos extraídos y aportar los resultados que se buscan.

En este caso, la hoja de cálculo realiza los balances hidrogeológicos en los límites laterales y las relaciones río-acuífero para cada tramo tenido en cuenta. El resultado final que muestra es el mismo que en el balance global, pero desglosando cada límite lateral y cada cauce introducido. (Tabla 5).

Identificador	Entradas		Salidas		Delta	Tipología río
	Recarga	53.92			53.92	
1	Borde Mira	9.15	Borde Mira	14.17	-5.02	
2	Borde Buñol Cheste	0.00	Borde Buñol Cheste	13.04	-13.04	
3	Rambla de la Torre	1.50	Rambla de la Torre	0.00	1.50	Perdedor
4	Río Madre	1.28	Río Madre	0.00	1.28	Perdedor
5	Río Magro	2.14	Río Magro	2.93	-0.79	Ganador
6	Río Buñol	0.56	Río Buñol	3.43	-2.88	Ganador
			Bombeos	9.52	-9.52	
	Total	68.54		43.09	25.45	

Tabla 5. Promedio anual del balance hidrogeológico por zonas.

Niveles piezométricos

Se ha preparado una hoja de cálculo en la que se recogen los datos de los pozos de observación incluidos en el modelo y se comparan con las alturas piezométricas simuladas en los mismos puntos.



Para poder obtener de manera que sea manejable la información en puntos concretos (en este caso las celdas en las que se encuentran los piezómetros), es necesario volver a recurrir GWChart, haciendo uso esta vez del módulo Hydrographs.

Al igual que se procedía para obtener los balances, se importa uno de los archivos generados por la ejecución del modelo en GWChart, siendo en este caso un archivo .fhd, que es el archivo que contiene toda la información referente a los niveles piezométricos simulados por MODFLOW.

También es necesario indicarle a GWChart las coordenadas de los puntos en los que se sitúan los piezómetros, así como la capa de la que se extraerán los datos. Se ha de tener especial cuidado con la elección de la capa, ya que si el nivel freático se encuentra por debajo de esta capa, el programa escribirá un valor absurdo (-100.000 por defecto) en el archivo de salida.

Guardando los datos que proporciona el programa, éstos se almacenarán en un archivo .txt que permitirá pegar directamente en la hoja de cálculo previamente preparada los valores simulados en cada celda en la que se encuentra un pozo de observación, de manera que puedan ser comparados.

En la ilustración 36 se muestran los diferentes valores registrados en los piezómetros en comparación con los valores simulados:







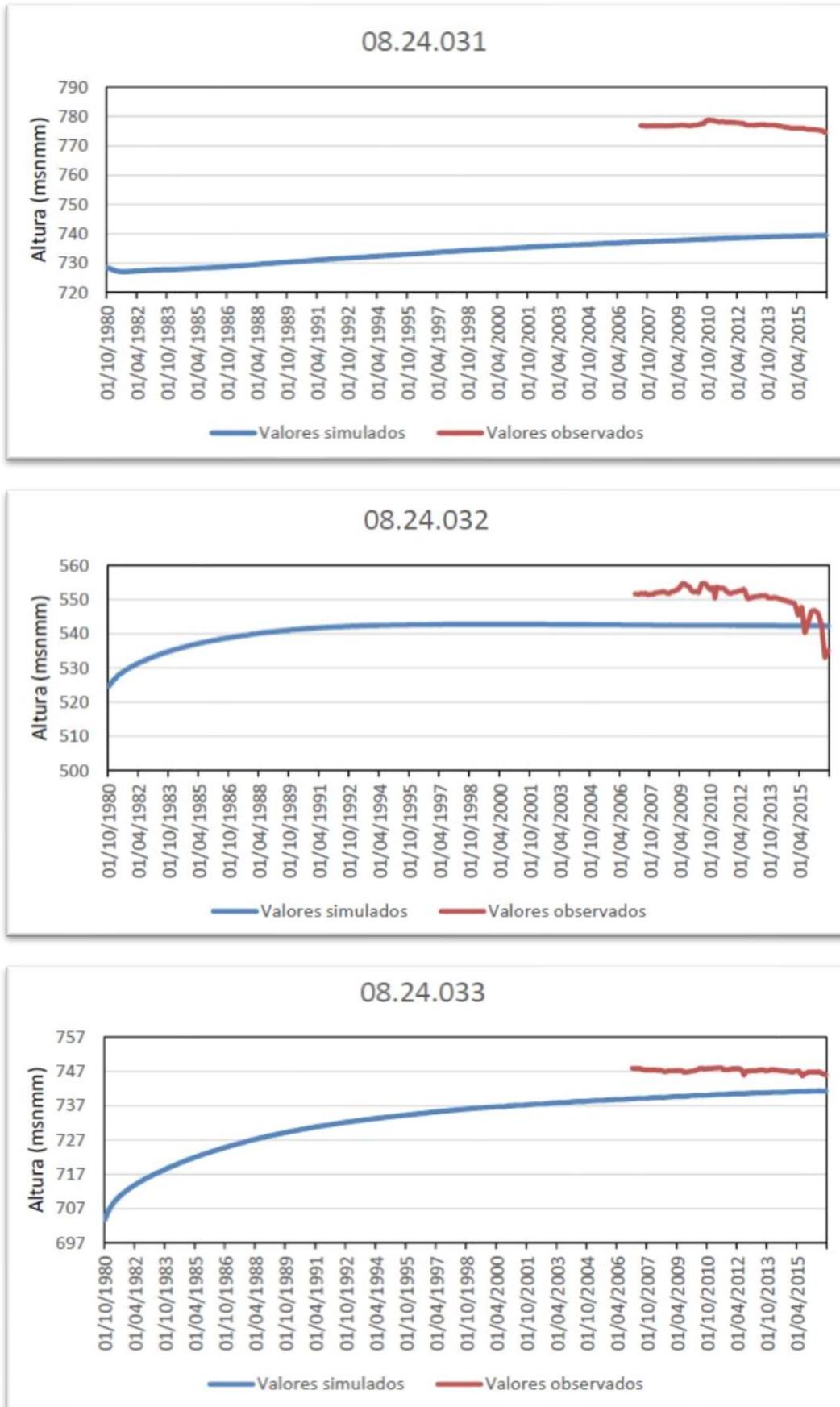


Ilustración 36. Comparación de los valores de los piezómetros observados con los valores de altura piezométrica simulados en esos mismos puntos.

5.1.1.- Análisis de los resultados de la primera ejecución del modelo

Aunque los resultados obtenidos en la primera ejecución no vayan a ser definitivos y, en algunos casos estén bastante lejos de parecerse a los resultados finales, sí se puede extraer de ellos alguna conclusión que ayude a calibrar el modelo.

De los piezómetros se puede observar que, a excepción del piezómetro 08.18.005, en el que los niveles piezométricos simulados se encuentran muy por encima de los observados, en torno a 80 m de diferencia, todos los demás se encuentran considerablemente por debajo. Aunque todos tienen una tendencia semejante a los valores observados, las alturas en las que comienzan las series parecen muy alejadas de estos valores. A primera vista la solución que se propone es elevar el nivel general de las alturas en toda la masa de agua, que se puede conseguir modificando las alturas y/o conductancias de los límites laterales, o bien elevando las alturas iniciales definidas.

Del balance zonal se puede extraer información acerca de los sentidos de los flujos en límites laterales y de la interacción río-acuífero. Aunque debido a la magnitud de las diferencias entre los niveles piezométricos simulados y los observados que se comentan anteriormente, no tenga mucho sentido analizar estos datos, ya que primero habrá que subsanar esa diferencia y los valores pueden variar, el balance zonal indica que el acuífero cede agua a las masas adyacentes, cuando en el límite con Mira debería ser esta masa la que da agua a Requena-Utiel. Respecto al intercambio de flujo entre los cauces superficiales y la masa de agua subterránea, pese a no ser valores significativos, los afluentes del Magro aparecen como perdedores; mientras que el río Magro y el Buñol lo hacen como ganadores.

5.2.- Calibración del modelo

El proceso de calibración del modelo tendrá como objetivo principal la reproducción más fiel posible de las alturas piezométricas medidas en los pozos de observación repartidos a lo largo de las dos masas de agua subterránea, sin descuidar los balances hidrológicos en las distintas zonas de interés.

Tal y como se comentó en el apartado anterior, el primer paso a realizar es el de conseguir elevar el nivel de agua general en el acuífero. Para ello se han llevado a cabo diversas probaturas en las alturas piezométricas y conductancias de los límites de Mira y Buñol-Cheste. Realizando cambios en estas variables no se ha conseguido

ningún cambio satisfactorio, por lo que se ha decidido dejarlos tal y como estaban al principio, pues su elección, basada en piezómetros cercanos, parece adecuada.

Por tanto, se ha modificado la condición inicial, que define las alturas piezométricas en estado inicial de la simulación del modelo.

Para ello, se ha obtenido un valor representativo de cada una de las series observadas en los piezómetros, obteniendo 10 puntos (aquellos en los que existe un pozo de observación) con un valor de altura. A partir de estos puntos, mediante una función integrada en ModelMuse, se ha hecho una interpolación a todas las celdas del modelo, logrando una altura piezométrica que servirá como dato inicial.

De esta manera, se ha pasado de tener unas alturas iniciales basadas en el terreno, a tener unas alturas iniciales coherentes con los datos observados (Ilustración 37).

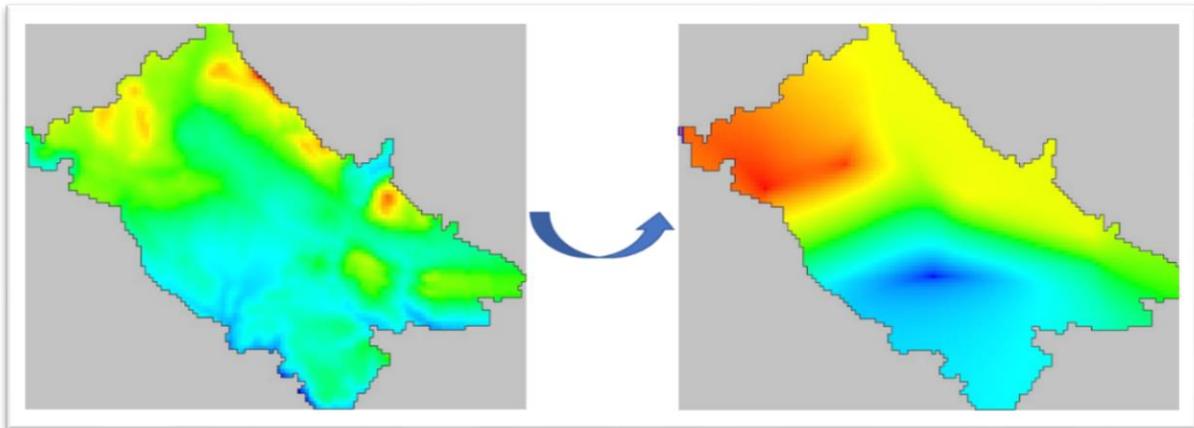


Ilustración 37. Altura inicial en el primer modelo y altura inicial en el proceso de calibración.

Las alturas piezométricas basadas en el modelo presentaban un alto rango de valores, desde 350 hasta 1000 m, aproximadamente, donde los más bajos se encontraban en el borde sudoeste, mientras que los más altos lo hacían en el borde noreste y noroeste, con un pico próximo al borde este.

Por otro lado, las alturas iniciales obtenidas en la calibración del modelo están en un rango aproximado de entre 550 y 790 m, con una tendencia de disminución hacia el sur.

Con esta modificación se ha conseguido disminuir la brecha existente entre los valores observados y los simulados en el modelo, por lo que el siguiente paso es el de encontrar unos parámetros hidrogeológicos para los cuales la diferencia entre estos valores sea lo menor posible.

El proceso de calibración de estos parámetros se ha llevado a cabo mediante prueba y error, analizando la influencia que cada parámetro tiene en el sistema al variar su valor, hasta conseguir los resultados deseados.

Como se ha explicado en el apartado 4.4., el modelo se ha dividido en 20 zonas, basadas en el modelo realizado con anterioridad por Fernández-Urizar (2017), y en las que los parámetros serán constantes a lo largo de toda su área.

Tras el proceso iterativo de prueba y error mediante el cual se ha calibrado el modelo, se ha llegado a los valores de la tabla 6:

Zona	K_x			S_s			S_y		
	Capa			Capa			Capa		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
ZonaAluvial_1	30	30	30	0.01	0.01	0.01	0.1	0.1	0.1
ZonaAluvial_2	0.14	0.14	0.13	0.03	0.03	0.0001	0.2	0.2	0.2
ZonaAluvial_3	6.0	6.0	4.0	0.01	0.01	0.0001	0.3	0.3	0.3
ZonaCarbonatadaAlta_1	6.0	6.0	4.0	0.02	0.02	0.0005	0.2	0.2	0.2
ZonaCarbonatadaAlta_2	4.0	4.0	3.0	0.02	0.02	0.0005	0.2	0.2	0.2
ZonaCarbonatadaAlta_3	2.0	1.0	0.8	0.02	0.02	0.0005	0.2	0.2	0.2
ZonaCarbonatadaAlta_4	2.0	1.0	0.8	0.02	0.02	0.0005	0.2	0.2	0.2
ZonaCarbonatadaMedia_1	5.0	5.0	3.0	0.01	0.01	0.00001	0.15	0.15	0.15
ZonaCarbonatadaMedia_2	5.0	5.0	4.0	0.01	0.01	0.00001	0.15	0.15	0.15
ZonaCarbonatadaMedia_3	0.1	0.1	0.09	0.01	0.01	0.00001	0.15	0.15	0.15
ZonaCarbonatadaMedia_4	0.05	0.05	0.03	0.0013	0.0013	0.00001	0.15	0.15	0.15
ZonaCarbonatadaMedia_5	1.2	1.2	1.2	0.01	0.01	0.00001	0.035	0.035	0.035
ZonaDetríticaMedia_1	0.01	0.01	0.01	0.4	0.4	0.1	0.2	0.2	0.2
ZonaDetríticaMedia_2	0.3	0.3	0.2	0.05	0.05	0.0001	0.2	0.2	0.2
ZonaDetríticaMedia_3	0.02	0.02	0.009	0.05	0.05	0.0001	0.2	0.2	0.2
ZonaDetríticaMedia_4	0.14	0.14	0.13	0.03	0.03	0.001	0.2	0.2	0.2
ZonaDetríticaMedia_5	0.06	0.06	0.05	0.05	0.05	0.02	0.3	0.3	0.3
ZonaDetríticaMedia_6	0.5	0.5	0.4	0.05	0.05	0.0001	0.2	0.2	0.2
ZonaDetríticaMuyBaja_1	0.1	0.1	0.08	0.01	0.01	0.00001	0.1	0.1	0.1
ZonaDetríticaMuyBaja_2	0.1	0.08	0.06	0.01	0.01	0.00001	0.1	0.1	0.1

Tabla 6. Valores de los parámetros hidrogeológicos una vez calibrados.

Siendo las unidades m/día para la conductancia y 1/m para el almacenamiento específico. El rendimiento específico no tiene unidades.

Por último, se calibrará la conductancia de los cauces para intentar reflejar los intercambios de flujo río-acuífero, procediendo de manera similar a la calibración de los parámetros hidrogeológicos. Puesto que no se conocen datos concretos del

intercambio de flujo entre los cauces y las masas de agua subterránea, el objetivo de esta calibración es la de conseguir que los ríos sean ganadores.

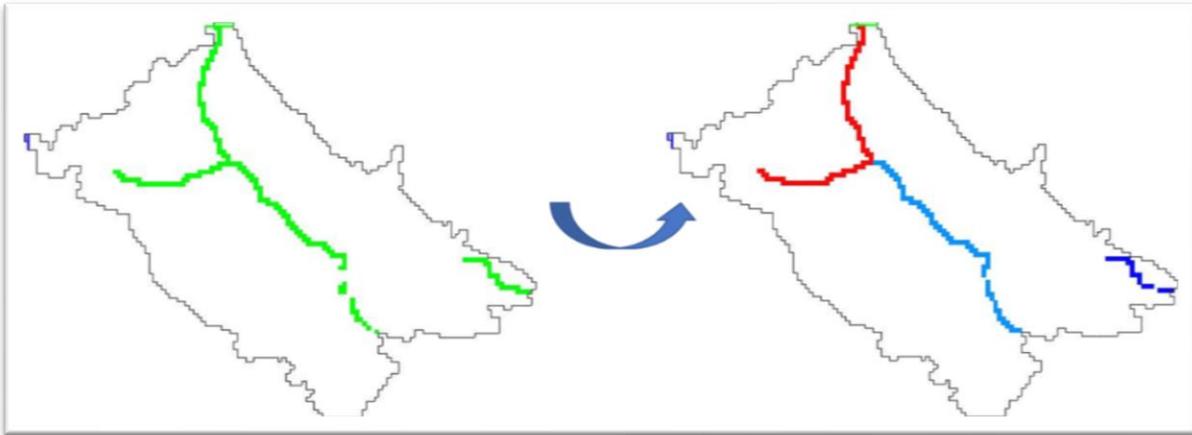


Ilustración 38. Conductancia de los cauces inicial y la asignada tras la calibración.

En el instante inicial, se había asignado a todos los cauces una conductancia de 100 m²/día. Tras la calibración, los valores en los afluentes del río Magro, la rambla de la Torre y el río Madre, se mantienen, mientras que la conductancia en el río Magro pasa a ser de 12 m²/día y en el río Buñol de 2.5 m²/día. (Ilustración 38).

5.2.1.- Análisis de los resultados del modelo calibrado.

Tal y como se procedió tras la ejecución del modelo sin calibrar, a continuación, se expondrán los datos de salida que nos proporciona MODFLOW una vez realizado el proceso de calibración. De la misma manera, será necesario tratar los datos previamente (utilizando GWChart) para poder manipularlos y entenderlos.

Balance global

El balance hidrogeológico global a lo largo del periodo de simulación que se obtiene del modelo calibrado queda representado en la ilustración 39 y en la tabla 7.

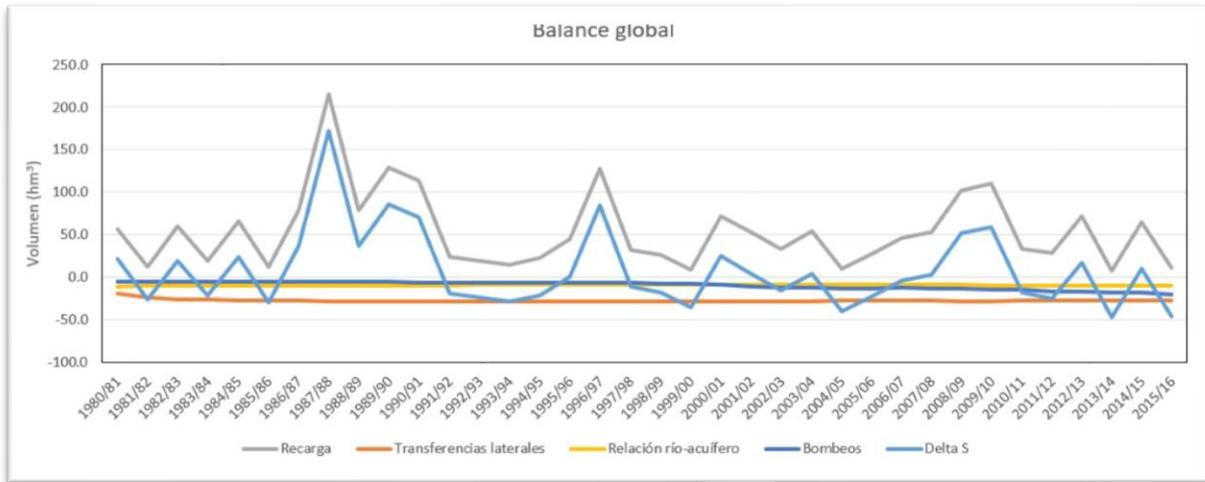


Ilustración 39. Balance global del sistema a lo largo del tiempo tras la calibración, en $\text{hm}^3/\text{año}$.

Con unos promedios anuales que se resumen en la siguiente tabla:

Entradas		Salidas		Diferencias
Recarga	53.92			53.92
Otras masas	15.62	Otras masas	43.04	-27.42
Río acuífero	1.87	Acuífero río	11.16	-9.28
		Bombeos	9.52	-9.52
Total	71.42		63.72	7.70

Tabla 7. Promedio anual del balance hidrogeológico en $\text{hm}^3/\text{año}$, una vez calibrado el modelo.

De estos resultados se puede extraer que, de media, las reservas de las masas de agua subterránea han estado aumentando 7.70 hm^3 cada año. Sin embargo, este valor puede dar lugar a equivocaciones, puesto que, viendo la gráfica, el balance ha sido negativo en los últimos años y la tendencia es descendente.

En términos globales, la recarga, teniendo en cuenta tanto la recarga por precipitación como la que proviene de retornos de riego, supone la principal fuente de agua para las masas de agua. Aunque ha habido años con una recarga muy elevada, no es habitual que ésta supere los 50 hm^3 . Además, estos últimos años se han alcanzado los valores mínimos y, teniendo en cuenta los efectos del cambio climático, no se prevé a corto y medio plazo que estos valores aumenten de manera cuantiosa.

Las salidas de agua de mayor envergadura se producen en los límites laterales, en el balance zonal se desglosarán las entradas y salidas de los dos bordes permeables en contacto con la masa de estudio.



Según la información de partida, el flujo de entrada en el límite con Mira ha ido disminuyendo en el tiempo y la salida en el borde de Buñol-Cheste aumentando. En el modelo no se ha conseguido reproducir estos cambios, aunque sí la tendencia de los últimos años.

En cuanto a los bombeos, se ha obtenido una media anual de 9,52 hm³. Este valor no supone una gran salida de agua en términos medios, pero debido al gran aumento de los pozos de extracción en los últimos años, la salida de agua por bombeos no ha dejado de crecer, suponiendo un problema para la sostenibilidad del acuífero en los próximos años

Balance por zonas

Utilizando la misma zonificación que en el modelo sin calibrar y mediante el paquete ZoneBudget, se ha analizado el balance hidrogeológico a lo largo del periodo estudiado en cada una de estas zonas.

Contorno con Mira

La transferencia de agua desde la masa subterránea de Mira a la de Requena-Utiel, que en el inicio de la simulación era de casi 26 hm³/año, ha sufrido un gran descenso entre el año hidrológico 1980/81 y el 1986/87, a partir del cual comienza a estabilizarse en torno a los 14,5 hm³/año (Ilustración 40).

En sentido opuesto, la transferencia desde la masa de agua subterránea Requena-Utiel a Mira, parece mantenerse constante a lo largo de todo el periodo, en valores próximos a los 8,15 hm³/año.

El balance resultante de la diferencia entre las entradas y salidas en la masa de Requena-Utiel mantiene una tendencia semejante a las entradas en ésta, desfasado los aproximadamente 8 hm³/año de salida hacia Mira. En los últimos años esta diferencia supone un flujo de agua desde la masa de Mira a la de Requena-Utiel de 6,5 hm³/año.

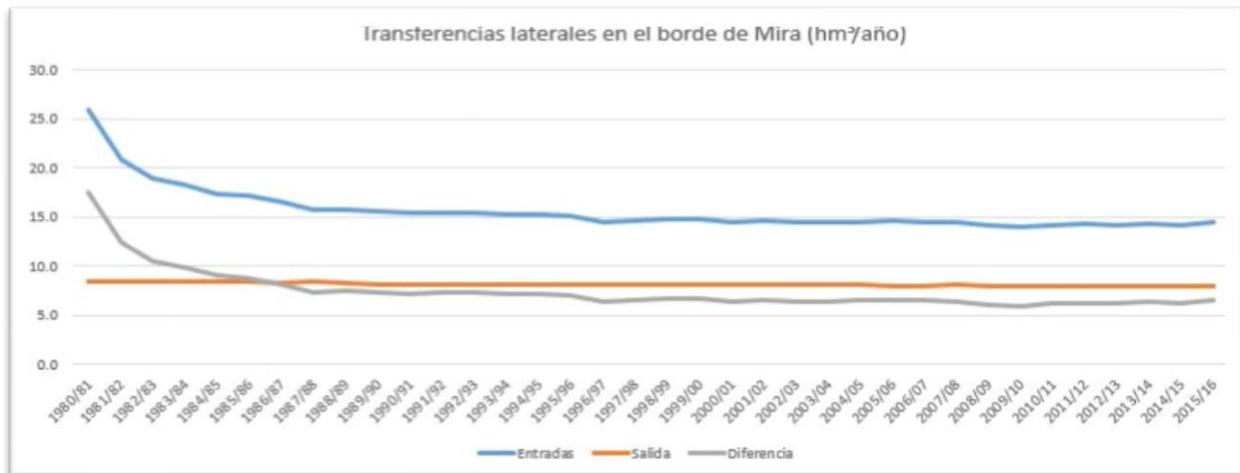


Ilustración 40. Balance hidrogeológico a lo largo del tiempo estudiado en el contorno con Mira (hm³/año).

Las últimas simulaciones de PATRICAL estiman una entrada desde la masa de agua subterránea de Mira a la de Requena-Utiel de entre unos 3 a 5 hm³/año. En este modelo la estimación asciende a unos 6,5 hm³/año, considerándose una buena aproximación.

Contorno con Buñol Cheste

En el borde de la masa de agua subterránea de Cabrillas-Malacara con la masa de Buñol-Cheste el flujo simulado es exclusivamente desde la primera a la segunda (Ilustración 41).

Este flujo es decreciente desde el primer año simulado hasta el último, con una tendencia constante y que va desde los 36 a los 33 hm³/año.

Según los datos obtenidos por PATRICAL, esta descarga en los últimos años es de unos 24 hm³/año. Pese a que los valores simulados podrían darse por válidos, la tendencia de los resultados simulados son totalmente opuestos a los observados, puesto que según el IGME, en 2011, la descarga hacia la masa de agua subterránea de Buñol-Cheste era de alrededor de 3 hm³/año, habiendo aumentado considerablemente respecto a la simulación, en la que la salida de agua disminuye lenta pero constantemente desde que se inicia el periodo de simulación.

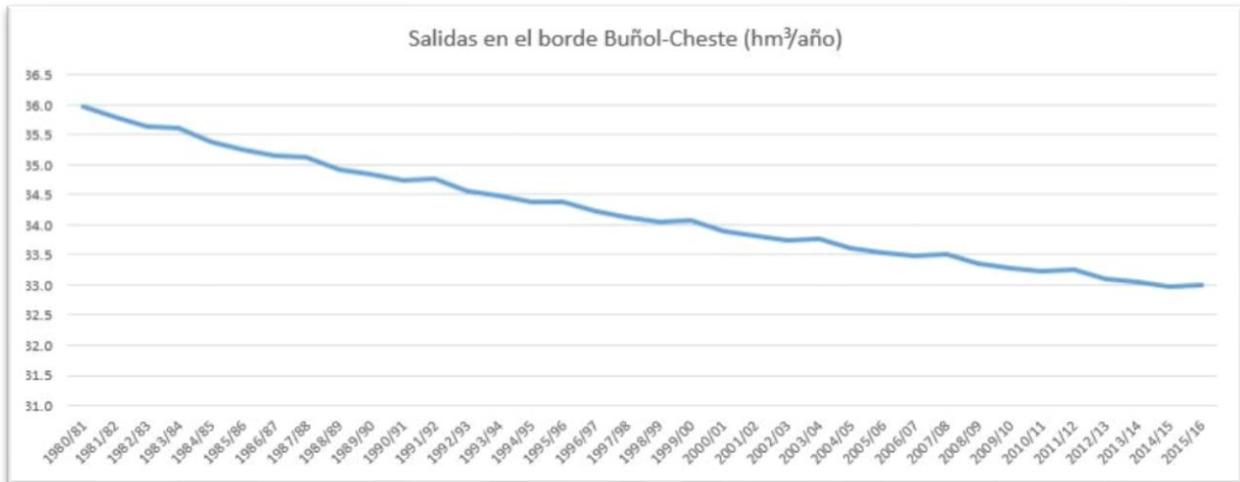


Ilustración 41. Balance hidrogeológico a lo largo del tiempo estudiado en el contorno con Buñol-Cheste (hm³/año).

Rambla de la Torre

El intercambio de flujo simulado entre la masa de agua subterránea Requena-Utiel y la rambla de la Torre circula únicamente en un sentido (Ilustración 42): desde el cauce hacia el acuífero, siendo el río perdedor, tal y como se apuntaba en el estudio de Martínez (2018).

En todo el periodo el rango de valores entre el que este flujo fluctúa es de 0,62 y 0,73 hm³/año. Puesto que no se dispone de datos reales sobre los valores de este flujo, se considerarán como buenos los resultados obtenidos.



Ilustración 42. Balance hidrogeológico a lo largo del tiempo estudiado en la rambla de la Torre (hm³/año).

Río Madre

Como puede observarse en la Ilustración 43, al inicio del proceso de simulación la descarga de agua desde el acuífero al río era de unos 3,5 hm³/año, valor que

disminuye rápidamente hasta llegar a los 0,5 hm³/año, valor en torno al cual se mantiene en los últimos años.

Por otro lado, desde el río al acuífero se ha transmitido en todo el periodo un flujo siempre próximo a 1 hm³/año. Pese a que este valor se ha mantenido constante, la disminución de las entradas al cauce desde la masa de agua subterránea ha provocado que el río pasara de ser ganador en los primeros años de la simulación a ser perdedor, estabilizándose en unos valores próximos a 0,7 hm³/año.

De la información recopilada, aunque no concuerden exactamente los años respecto de los que se tiene información, sí la tendencia, puesto que se conoce a través del IGME-DGA (2011) que el río era, al menos en esa fecha, ganador; mientras que a partir de Martínez (2018), la rambla de la Torre se considera como perdedora respecto al acuífero.

La línea gris de la gráfica representa la diferencia entre las entradas de agua al cauce y las salidas, por lo que los valores negativos significan una ganancia de agua del río, mientras que los positivos una descarga de éste hacia la masa subterránea.

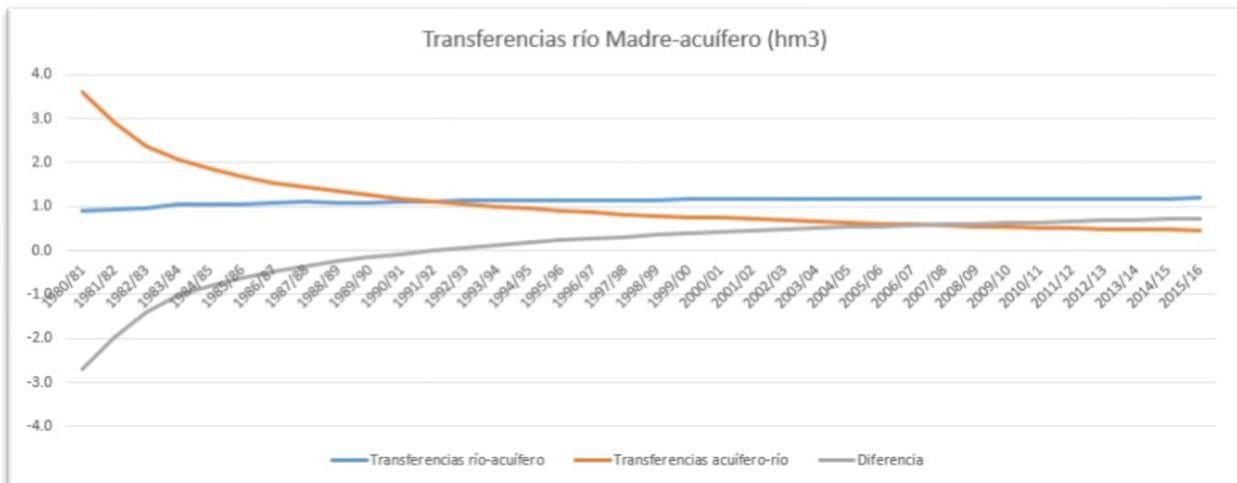


Ilustración 43. Balance hidrogeológico a lo largo del tiempo estudiado en el río Madre (hm³/año).

Río Magro

Las transferencias entre la masa de agua subterránea y el río Magro, que nace de la confluencia de la rambla de la Torre y el río Madre, no guardan relación con las obtenidas para estas dos. Los valores simulados en el modelo calibrado para este tramo de cauce, que cruza tanto la masa de agua subterránea Requena-Utiel como la de Cabrillas-Malacara, se muestran en la ilustración 44.

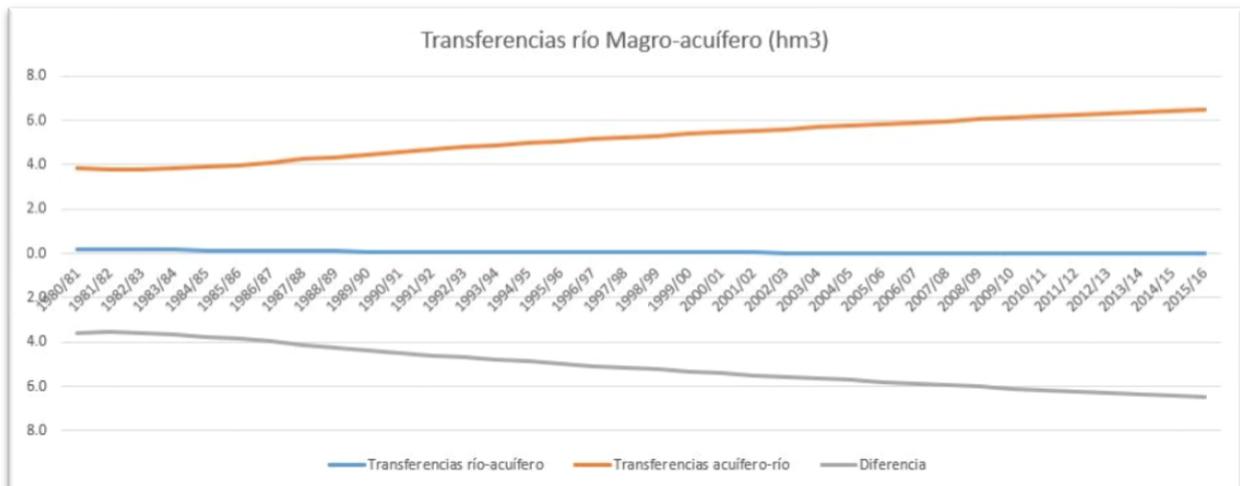


Ilustración 44. Balance hidrogeológico a lo largo del tiempo estudiado en el río Magro (hm³/año).

De ésta se extrae que la descarga del río hacia el acuífero se ha mantenido durante todo el periodo prácticamente nula, mientras que la entrada al río ha aumentado progresivamente desde los 4 hm³/año hasta algo más de 6 hm³/año. La línea gris, que supone la diferencia entre entrada de agua al acuífero desde el río, es prácticamente igual a la de entrada en valor absoluto.

El río es claramente ganador, cosa que según Martínez (2018), no debería ser así a excepción de la zona bajo la confluencia, al menos en los últimos años.

En el caso de que se hubiesen detectado entradas más cuantiosas de agua al acuífero, esta simulación podría considerarse correcta, puesto que no se hace diferencia a la zona del cauce en la que se producen las transferencias. Puesto que no es así, la simulación no parece ser muy próxima a la realidad.

Río Buñol

En el caso del río Buñol, en el modelo calibrado solo se producen entradas de agua desde el acuífero, siendo así ganador, tal y como se esperaba (Ilustración 45).

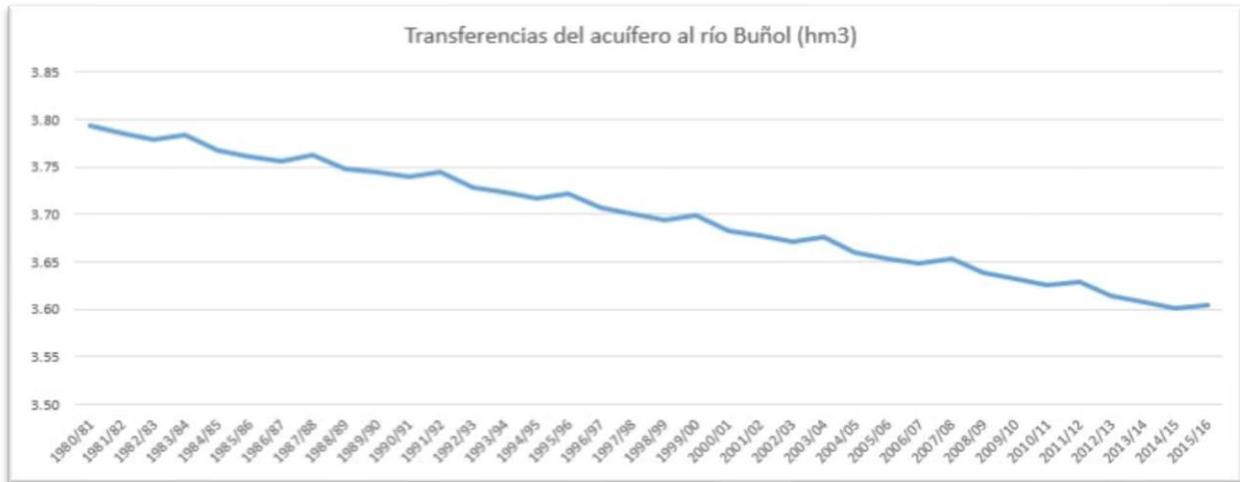


Ilustración 45. Balance hidrogeológico a lo largo del tiempo estudiado en el río Buñol (hm³/año).

Aunque la gráfica pueda inducir a error por la escala vertical, el decrecimiento del caudal entrante al río es prácticamente despreciable, habiendo disminuido únicamente 0,15 hm³/año en todo el periodo, desde unos 3,80 a 3,65 hm³/año.

Resumen del balance zonal

A continuación (Tabla 8) se aporta un resumen los resultados obtenidos en el modelo calibrado en cada una de las zonas, en la que se muestran los promedios de entrada y salida de cada una de ellas, teniendo en cuenta el periodo comprendido desde el año 1980/81 a 2015/16.

Identificador	Entradas		Salidas		Delta	Tipología río
	Recarga	53.92			53.92	
1	Borde Mira	15.62	Borde Mira	8.15	7.47	
2	Borde Buñol Cheste	0.00	Borde Buñol Cheste	34.23	-34.23	
3	Rambla de la Torre	0.68	Rambla de la Torre	0.00	0.68	Perdedor
4	Río Madre	1.12	Río Madre	1.08	0.05	Perdedor
5	Río Magro	0.07	Río Magro	5.17	-5.10	Ganador
6	Río Buñol	0.00	Río Buñol	3.70	-3.70	Ganador
			Bombeos	9.52	-9.52	
	Total	71.42		61.84	9.58	

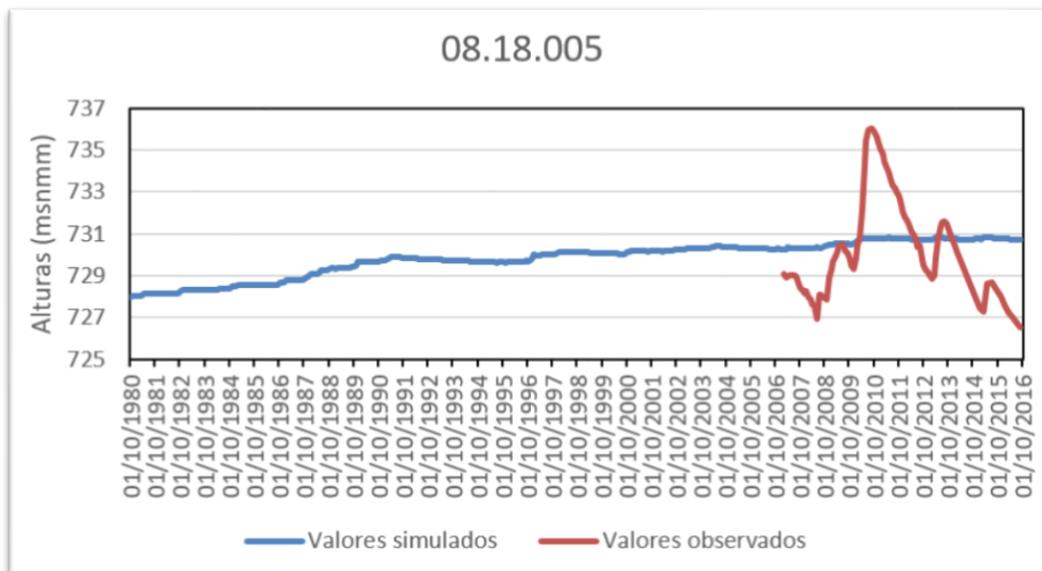
Tabla 8. Promedio anual del balance hidrogeológico por zonas en hm³/año, una vez calibrado el modelo.

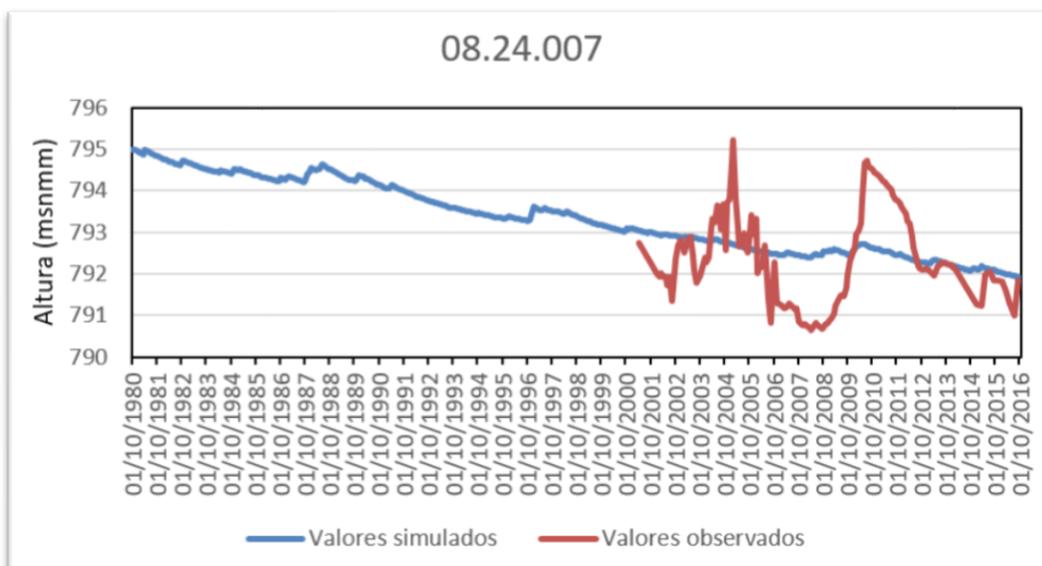
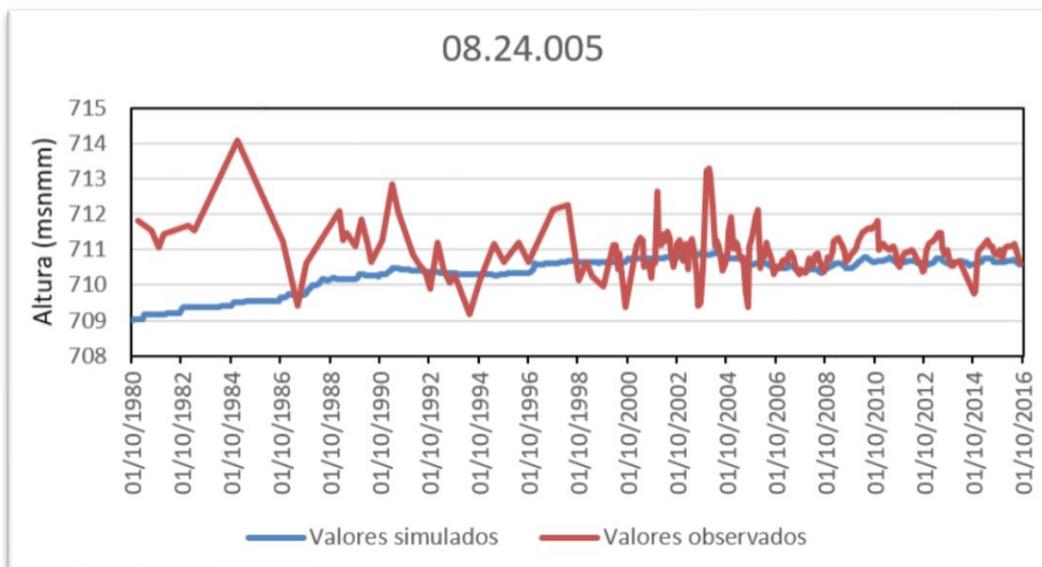
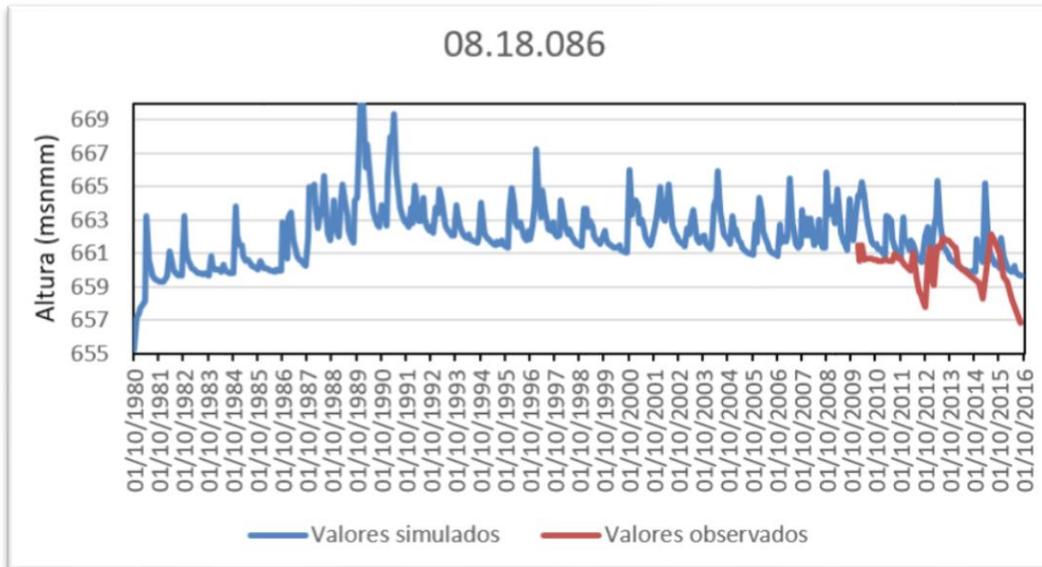
Niveles piezométricos

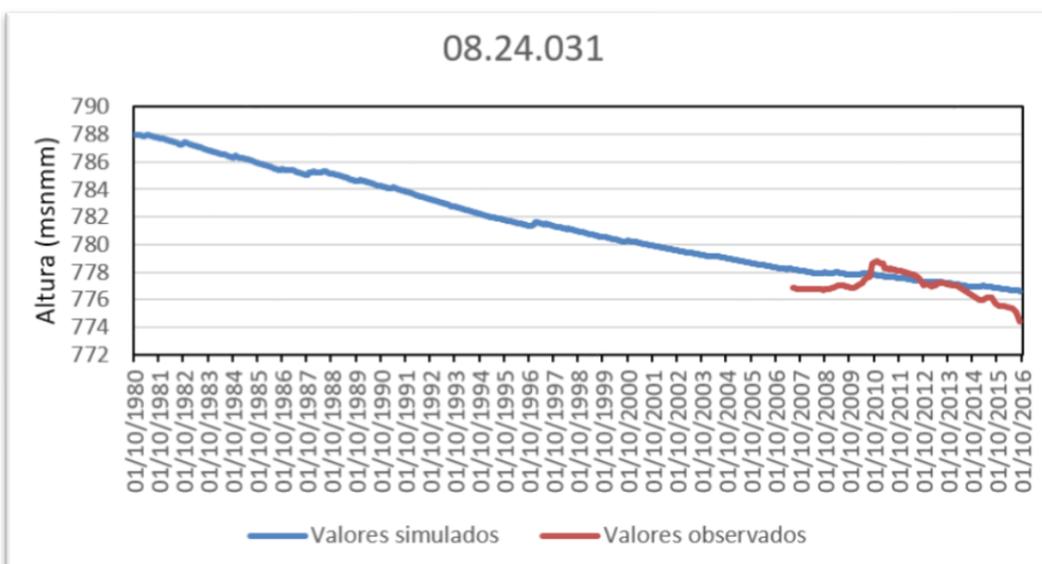
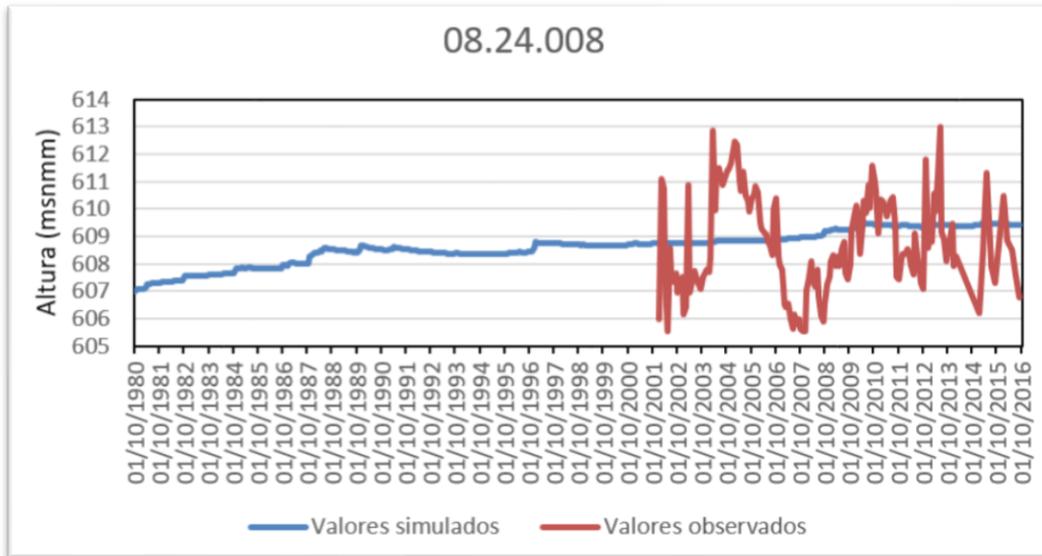
Pese a que mediante el calibrado se ha intentado simular de la manera más fiel posible, teniendo en cuenta la poca precisión de los datos que se dispone, los flujos en los dos límites laterales considerados en el modelo y las interacciones entre los

diversos cauces superficiales y las masas de agua, la prioridad en la calibración del modelo siempre ha sido la reproducción de los niveles piezométricos observados en los pozos de observación existentes en la zona.

En la ilustración 46 se representan las gráficas que comparan los valores de las alturas piezométricas simulados en el modelo con los observados en el piezómetro correspondiente.







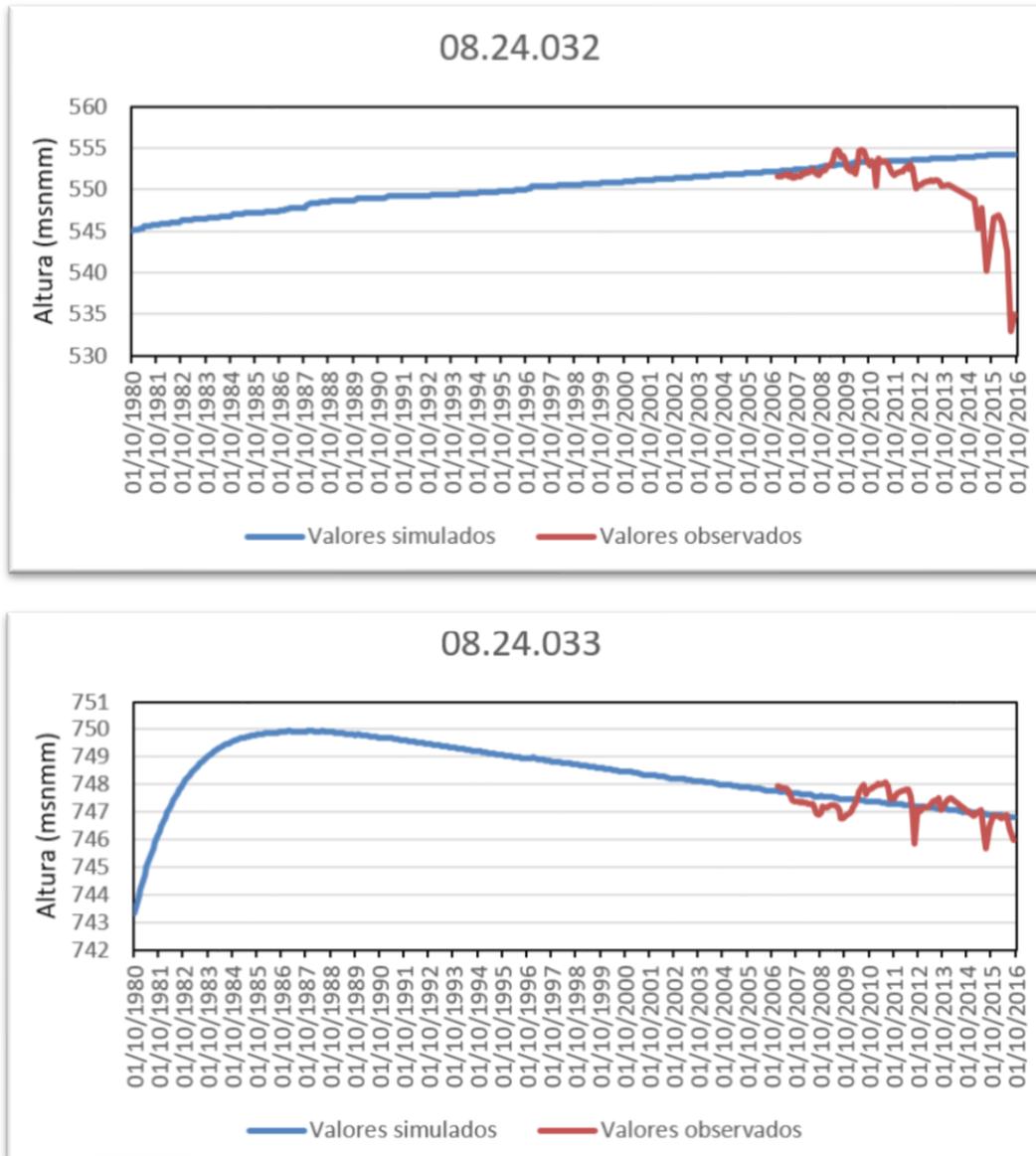


Ilustración 46. Comparación entre valores simulados del modelo calibrado y valores observados en los piezómetros.

De estos resultados se observa que el modelo ha conseguido reproducir la evolución de los niveles piezométricos en la mayoría de los piezómetros.

A primera vista destacan los piezómetros 08.24.010 y 08.24.032, encontrándose discrepancias de casi 30 m entre los valores observados y los simulados en el primero de ellos y de más de 20 m en el segundo.

En la calibración del modelo se han encontrado parámetros para los cuales estos piezómetros, por separado, presentaban valores más próximos a los reales pero que, en términos globales, suponían una calibración de menor calidad. Estas diferencias pueden ser debidas a la falta de información en la zona.



En otros piezómetros, como el 08.18.005, 08.24.005, 08.24.008, se observa que, pese a que en los periodos en los que hay datos observados los simulados son muy similares a estos, la piezometría tiene una tendencia ascendente, cuando tras lo comentado en apartados anteriores se presupone que debería ser totalmente al contrario. Esto puede deberse a una incorrecta definición de la condición inicial.

Por otra parte, en el piezómetro 08.18.003, al inicio de la serie de los datos registrados se aprecia un aumento repentino de los niveles que podría deberse a algún fallo en la instalación del mismo y en el que la diferencia respecto al valor observado de más de 3 m. Teniendo en cuenta el tipo de modelo, no supone un error reprochable, pero llama la atención puesto que el resto de la serie concuerda en gran medida.

Una vez analizados los niveles piezométricos, se llega a la conclusión de que la calibración, pese a que podría ser más precisa con un mayor grado de conocimiento de la zona, es buena, y ello se podrá constatar en el siguiente apartado.

5.2.2.- Análisis de la bondad de ajuste del modelo

La bondad de ajuste de un modelo describe lo bien que se ajusta un conjunto de observaciones. Las medidas de bondad en general resumen la discrepancia entre los valores observados y los valores simulados en el modelo.

En la observación de datos en ModelMuse existe un apartado para la visualización de resultados relativos a los niveles piezométricos observados, el cual permite realizar un análisis de las diferencias entre los valores simulados y observados (los residuos) en cada uno de los pozos de observación en aquellos tiempos que estando dentro del periodo de simulación, disponen de datos observados.

De esta manera se evalúa el ajuste de las series piezométricas simuladas a las observadas.

En la pestaña de valores de este apartado, ModelMuse muestra toda la información referida a la comparación de los valores simulados con los observados en forma de tabla, siendo ésta:

- Observation Name: nombre del pozo de observación.
- Residual: el residuo (diferencia entre el valor observado y el simulado).
- Observed Value: valor observado.
- Simulated Value: valor simulado.
- X/Y: las coordenadas X e Y en las que se encuentra situado el pozo de observación.
- Time: tiempo para el cual se comparan ambos valores.

- Object Name: nombre del objeto con cual se ha representado el pozo de observación en ModelMuse

Esta información puede extraerse y ser utilizada en una hoja de cálculo, de manera que se puedan manipular estos datos para un mejor entendimiento de ellos.

En otra de las pestañas se muestran los valores observados versus los simulados (Ilustración 47).

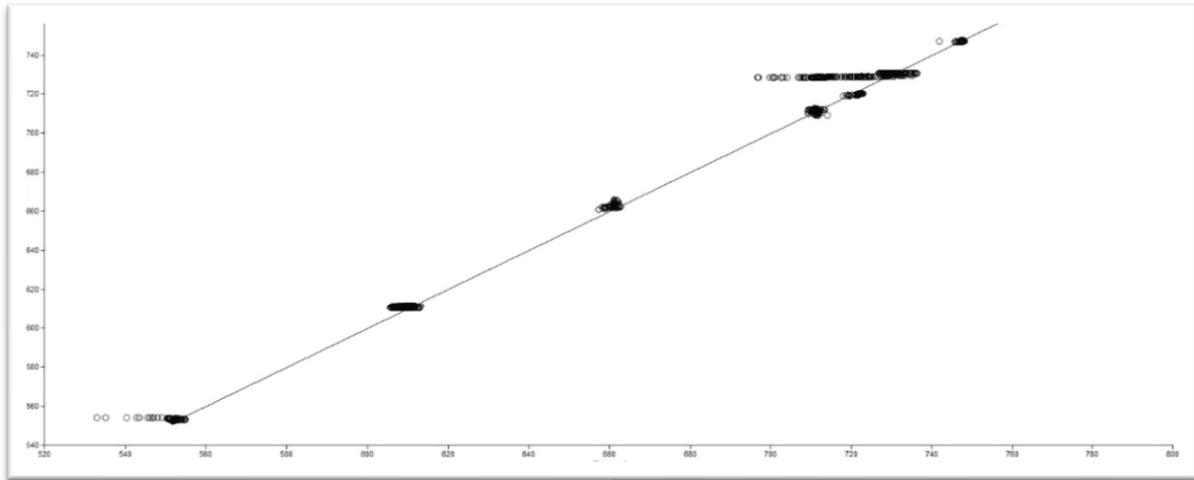


Ilustración 47. Análisis estadístico de los valores observados en comparación con los simulados.

Esta gráfica representa la dependencia lineal entre los valores de los niveles piezométricos simulados y los observados, mostrando el grado en el que los valores simulados se distribuyen sobre la recta de ajuste perfecto.

Exportando la información a una hoja de cálculo y reordenando los datos, se ha construido una gráfica semejante a la anterior en la que se representa el promedio de los valores observados y de los simulados agrupados en sus respectivos pozos de observación. Esta gráfica puede verse en la ilustración 48.



Ilustración 48. Análisis estadístico de los valores observados en comparación con los simulados en cada pozo de observación.

A simple vista se puede ver que la mayoría de valores simulados no se diferencian en gran medida de los observados, a diferencia del residuo que se da en el pozo 08.24.031, que es de unos 3,4 m y, sobre todo, del que aparece en el pozo 08.24.010, que llega a alcanzar los 12 m.

Por otra parte, en la ilustración 49 se aporta un histograma en el que se contabilizan la frecuencia de los residuos en intervalos de 2 m.

Más del 80% de los valores se concentran en el rango que va desde -4 a 4 m de residuo, por lo que gran parte de ellos significan que el valor de la simulación se encuentra próximo al valor observado.

También se ha comprobado que los residuos mayores, en valor absoluto, de 5,7 m corresponden a los pozos de observación 08.24.010 y 08.24.32, siendo mayoritarios en el primero de ambos y para el que se han llegado a registrar diferencias de hasta casi 32 m. Sin duda, estos dos piezómetros son en los que peores resultados se han obtenido. Estas diferencias pueden deberse a la falta de información en esa zona.

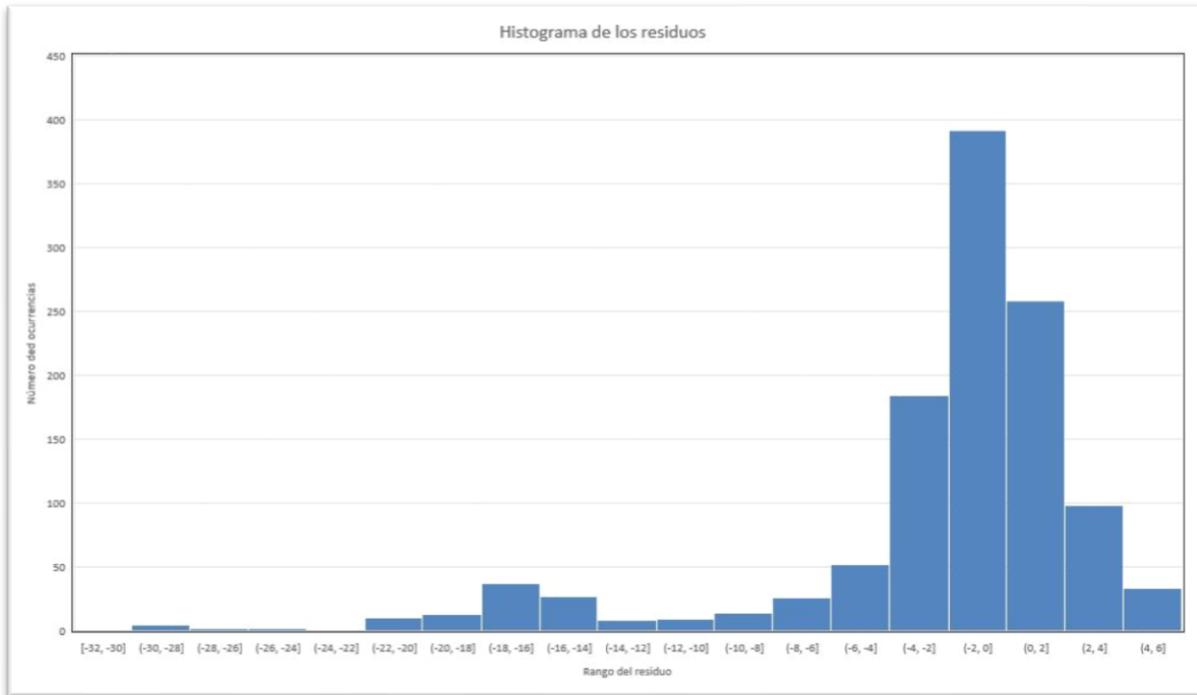


Ilustración 49. Número de ocurrencias entre los residuos.

Pese a que algunos datos obtenidos puedan resultar muy dispares, a continuación se presentan una serie de indicadores estadísticos que comprobarán que la calibración del modelo es buena.

ModelMuse también calcula el valor de la raíz del error cuadrático medio, que en este caso es 6,17.

Sin embargo, para constatar este valor, se ha calculado a partir de los datos recogidos en la hoja de cálculo, junto a otros indicadores estadísticos que sirvan de ayuda para evaluar la calibración del modelo:

- Raíz del error cuadrático medio (RECM): representa la desviación de los valores simulados en contraste con los observados. Su valor nunca puede ser negativo, y uno de 0 indicaría un ajuste perfecto a los datos. Al tratarse de la raíz cuadrada del promedio de los errores cuadrados, el efecto de cada error es proporcional al tamaño del error cuadrado, por lo que los errores mayores tienen un efecto mayor, siendo muy sensible a los valores atípicos.

$$RECM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (h_{sim,i} - h_{obs,i})^2}{n}}$$

Como era de esperar, se ha obtenido exactamente el mismo valor que el calculado en MODFLOW: 6,16.



- Eficiencia de Nash-Sutcliffe : este es uno de los criterios más utilizados en hidrología. Mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. El rango de valores teórico va desde menos infinito a 1, valor que significa que la simulación es perfecta.

Los valores sugeridos para la toma de decisión están resumidos en la siguiente tabla:

Excelente	Muy bueno	Bueno	Satisfactorio	Insuficiente
>0.8	0.6-0.8	0.4-0.6	0.2-0.4	<0.2

Tabla 9. Valores de referencia del Criterio de Nash-Sutcliffe

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (h_{sim,i} - h_{obs,i})^2}{\sum_{i=1}^n (h_{obs,i} - \bar{h}_{obs})^2}$$

El resultado obtenido de aplicar esta fórmula es 0,992.

- Coeficiente de determinación (R^2): es un estadístico usado en el contexto de un modelo en el que el objetivo principal es predecir futuros resultados o probar una hipótesis. Éste determina la calidad de modelo para replicar los resultados, y la proporción de variación de los resultados que puede explicarse por el modelo. El coeficiente de determinación es el cuadrado del coeficiente de correlación de Pearson. Sus valores varían entre 0 y 1, para el que el valor 1 indica un ajuste perfecto.

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n ((h_{obs,i} - \bar{h}_{obs}) \times (h_{sim,i} - \bar{h}_{sim}))}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (h_{obs,i} - \bar{h}_{obs})^2 \times \sum_{i=1}^n (h_{sim,i} - \bar{h}_{sim})^2}} \right)^2$$

El coeficiente de determinación obtenido ha sido 0,993.

A modo de resumen, en la tabla 11, se muestran los valores obtenidos para los distintos indicadores:

Indicador	Valores de referencia		Resultado
RECM	Perfecto	0	6.16
Eficiencia de Nash-Sutcliffe	Excelente	>0.8	0.992
	Muy bueno	0.6-0.8	
	Bueno	0.4-0.6	
	Satisfactorio	0.2-0.4	
	Insuficiente	<0.2	
R^2	Perfecto	1	0.993

Tabla 10. Valores obtenidos para cada indicador.



Modelo matemático del flujo de agua subterránea de los
acuíferos de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara (Valencia)



6.- Recomendaciones y prospectiva

La creación de este modelo se ha llevado a cabo utilizando los datos disponibles más actualizados. No obstante, estos datos están incompletos o no están actualizados, por lo que influyen en la creación del modelo conceptual y, en definitiva, en el modelo matemático. A continuación, se exponen algunos de los puntos en los que se debería incidir para que, en futuros modelos, estos puedan tener una mayor precisión.

Para definir la discretización vertical del modelo la base tomada ha sido el modelo construido en el año 2001. Desde esta fecha, han sido varios los estudios y trabajos que se han efectuado en relación a profundizar y expandir el conocimiento del sistema, del mismo modo que a situar la delimitación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel. Es por ello que, para conseguir los objetivos que se requieren en esta masa, se recomienda que se actualice la información litológica de la zona con estas nuevas delimitaciones.

Partiendo de esta nueva delimitación, también es necesario tomar la iniciativa en profundizar en las interacciones entre el sistema y su entorno. Se hace fundamental estudiar los contornos de la masa de agua subterránea para poder llegar a entender de manera más precisa las interacciones de ésta con las masas adyacentes.

En toda la zona de afección solamente se encuentra la mencionada estación de aforos en el río Magro a la altura de Requena. La poca información que se conoce acerca de los caudales de los cauces superficiales en la región hace complicado el conocimiento de las interacciones entre los distintos cauces y las masas de agua subterránea. De igual manera, el poco conocimiento que se pueda tener de la relación entre el río Magro y el acuífero no es aplicable a todo el sistema, ya que ésta es variante en el espacio.

Hoy en día la red de piezómetros no dispone de una cantidad de series de datos suficiente, además de que muchas de estas series no tienen registrados periodos de tiempo suficientemente largos. En una zona tan problemática como es la de Requena-Utiel, se debería tratar de aumentar el número de piezómetros para contar con un mayor control sobre los niveles piezométricos.

Por último, se debería incentivar la actualización de los sistemas de regadío y la aplicación de buenas prácticas con el objetivo de aumentar la eficiencia, de manera



que se consiga un ahorro de agua que se traduzca en una menor necesidad de la explotación del recurso hídrico, tanto superficial como subterráneo.

7.- Conclusiones

El objetivo de este trabajo ha sido elaborar un modelo matemático de flujo de agua subterránea de las masas de agua subterránea de Requena-Utiel y Cabrillas-Malacara que ayude a comprender el estado en el que se encuentra la primera de ellas y que, dado el caso, sirva de cara al futuro.

Este modelo se ha realizado con el software MODFLOW utilizando la interfaz gráfica de usuario ModelMuse. A lo largo de todo el trabajo ha quedado claro cómo, a través de las herramientas de las que se dispone hoy en día, resulta sencillo la introducción de unos datos para la creación de un modelo de estas características. Sin embargo, el verdadero reto consiste en decidir qué datos se van a introducir.

A pesar de todos los estudios y análisis realizados hasta hoy, aún existe una gran incertidumbre y desconocimiento de la realidad. Este vacío de información conlleva a que muchos de los datos que son utilizados para la creación del modelo sean suposiciones o hipótesis del modelador, y que pueden ser más o menos acertados en base a la experiencia de éste.

Respecto a las conclusiones a las que se llega tras el análisis de los resultados del modelo calibrado, éstas se desarrollan en los siguientes párrafos.

Todo el sistema está condicionado por el aumento desde los años 80 de la extracción de agua desde la masa subterránea provocado principalmente por el aumento de las zonas dedicadas a actividades agrícolas. Esto ha repercutido en el sistema disminuyendo el flujo que el acuífero drena a los cauces superficiales de la zona, así como los niveles piezométricos. A su vez, se han producido pequeños cambios graduales en la climatología que han influido negativamente en el agua almacenada en el acuífero, como son el aumento de la temperatura y la disminución de las precipitaciones. Todo ello da lugar a confirmar el mal estado cuantitativo de la masa de agua subterránea Requena-Utiel, tal y como se declara en el plan hidrológico del ciclo 2015-2021.

En lo referente a las interacciones del acuífero con los distintos ríos que fluyen por la zona, a excepción del río Buñol, en el que se aprecia como poco a poco el flujo desde la masa subterránea de Cabrillas-Malacara a éste disminuye lentamente, los resultados obtenidos no dejan claro cual es la situación, ya que sobre todo en el río



Magro, éstos no concuerdan con el estudio llevado a cabo por Martínez (2018).
Estudio de la conexión río-acuífero del río Magro (Valencia).

Como era de esperar, los mayores problemas en la piezometría tienen lugar en los alrededores de los municipios más poblados de la región, como puede observarse en el pozo de observación 08.24.010, el cual se encuentra entre los municipios de Requena y de Utiel y presenta una diferencia de altura de unos 35 m entre los años 1998 y 2016. Por el contrario, en las zonas en las que no existe una gran concentración de pozos de extracción no se aprecia una disminución notable de las alturas piezométricas.

Como se ha podido extraer de las gráficas de los niveles piezométricos simulados en comparación con los observados, uno de los datos más influyentes a la hora de concretar un modelo es la condición inicial, pues ésta marca el punto de partida de los niveles piezométricos. Por ello, es importante que estos datos estén basados en la medida de lo posible en datos físicos conocidos.

Para estimar la bondad del ajuste de un modelo es necesario realizar un análisis de los resultados conseguidos utilizando para ello algunos indicadores estadísticos que comparen los valores simulados a partir del modelo con los observados. Para determinar la fiabilidad de este modelo se han utilizado algunos indicadores típicos y otros más concretos del campo de la hidrología, para los que se han conseguido valores satisfactorios.

Sin embargo, se ha de tener siempre presente que existe cierta incertidumbre en este tipo de modelos, y que para la utilización de éstos se ha de tener un gran conocimiento y experiencia sobre el funcionamiento del sistema.

8.- Bibliografía

- CHJ (1998). *Plan Hidrológico de la Cuenca del Júcar*.
Real Decreto 1664/1998, de 25 de julio.
- CHJ (2001). *Redacción del plan de explotación de la unidad hidrogeológica 08.24 "Utiel-Requena"*.
Capítulo 6, páginas 415-494.
- CHJ (2001). *Redacción del plan de explotación de la unidad hidrogeológica 08.24 "Utiel-Requena"*.
- CHJ (2005a). *Informe para la Comisión Europea sobre los Artículos 5 y 6 de la Directiva Marco del Agua*.
Demarcación Hidrográfica del Júcar.
- CHJ (2005b). *Delimitación y caracterización de los acuíferos en las masas de agua subterránea de la Confederación Hidrográfica del Júcar*.
- CHJ (2009a). *Identificación y delimitación de las masas de agua superficial y subterránea*.
Ámbito de la Confederación Hidrográfica del Júcar.
- CHJ (2014). *Plan hidrogeológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar del ciclo 2009-2015*.
Real Decreto 595/2014, de 11 de julio.
- CHJ (2016). *Plan hidrogeológico de la Demarcación Hidrográfica del Júcar del ciclo 2015-2021*.
Real Decreto 1/2016, de 8 de enero.
- CHJ (2016). *Plan de explotación de la masa de agua subterránea Requena-Utiel*.
- CHJ (2017). *Seguimiento del Plan de Explotación de la masa de agua subterránea 080.133 Requena-Utiel*.
Campaña del año hidrológico 2016/2017.
- CHJ (2018). *Seguimiento del Plan de Explotación de la masa de agua subterránea 080.133 Requena-Utiel*.
Campaña del año hidrológico 2017/2018.



- MIMAM (2005). *Estudio inicial para la identificación y caracterización de las masas de agua subterránea de las cuencas intercomunitarias.*
- IGME-DGA (2009). *Apoyo a la caracterización adicional de las masas de agua subterránea en riesgo de no cumplir los objetivos medioambientales en 2015.*
- IGME-DGA (2011). *Informe sobre la caracterización básica de las masas de agua subterránea de la Confederación Hidrográfica del Júcar.*
- Pérez-Martin, M.A. (2005). *Modelo distribuido de simulación del ciclo hidrológico con calidad de aguas integrado en sistemas de información geográfica para grandes cuencas. Aportación al análisis de presiones e impactos de la Directiva Marco Europea del Agua.*
Ph. D. Thesis, Universitat Politècnica de València.
- Mercé Gallo, A. (2015). *Estudio de alternativas de gestión de agua subterránea en la cuenca del río Magro.*
Trabajo de fin de grado, Universitat Politècnica de València, 88 p.
- Fernández-Urizar, I. (2017). *Modelación matemática del flujo de agua subterránea del acuífero de Requena-Utiel. Estudio del plan de explotación de la masa de agua.*
Trabajo de fin de máster, Universitat Politècnica de València, 95 p.
- Martínez Gil, P. (2018). *Estudio de la conexión río-acuífero del río Magro (Valencia).*
Trabajo de fin de grado, Universitat Politècnica de València, (sin acabar).
- López-Fernández, J. (2018). *Análisis del inventario de manantiales de la Confederación Hidrográfica del Júcar y modelización de su comportamiento hidrológico.*
Trabajo de fin de máster, Universitat Politècnica de València, 114 p.
- Herbert, F. Wang y Mary P. Anderson. (1982). *Introduction to Groundwater Modeling.*
W. H. Freeman and Company.
- McDonald, M. y Harbaugh, A. (1984). *A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model.*
U.S. Geological Survey, Open File Report 83-875.
- Winter, T. C., Harvey, J. W., Franke, O.L. & Alley, W. M. (1998). *Ground Water and Surface Water A Single Resource.*



U.S. Geological Survey (USGS).

Harbaugh, A. (2005). MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model-the Ground-Water Flow Process.

U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16.

Winston, R.B. (2009). ModelMuse. A graphical user interface for MODFLOW-2005 and PHAST.

Chapter 29 of Section A, Ground Water Book 6, Modeling Techniques, U.S. Geological Survey.