



Modelo de flujo subterráneo de los acuíferos de la Mancha Oriental y sus relaciones con el río Júcar



Río Júcar

Informe realizado para:



Modelo de flujo subterráneo de los acuíferos de la Mancha Oriental y sus relaciones con el río Júcar

Eduardo Cassiraga* David Sanz** Santiago Castaño** Óscar Álvarez* y Andrés Sahuquillo*

* Grupo de Hidrogeología
Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente Universitat Politècnica de València
C/. Camino de Vera, s/n., 46022, Valencia
e-mail: eduardo.cassiraga@gmail.com Tel: +34 963 879 613 Fax: +34 963 879 492

** Grupo de Hidrogeología Instituto de Desarrollo Regional Universidad de Castilla-La Mancha
Campus Universitario, s/n., 02071, Albacete e-mail: david.sanz@uclm.es Tel: +34 967 599 200 Fax: +34 967 599 233

Valencia – Abril de 2013 – Albacete

Índice general

Resumen						
1.	Introducción 1.1. Objetivo	1 1				
	1.2. Justificación	2				
	1.3. Antecedentes	3				
2.	Modelo conceptual	7				
	2.1. Localización del área de estudio	7				
	2.2. Contexto hidrológico	8				
	2.3. Contexto hidrogeológico	9				
	2.3.1. Límites del sistema \ldots	9				
	2.3.2. Unidades hidrogeológicas	10				
	2.3.3. Dominios hidrogeológicos	10				
	2.4. Modelo hidrogeológico conceptual	12				
3.	Selección del código y diseño del modelo	15				
	3.1. El modelo matemático y el código	15				
	3.2. Discretización espacio-temporal y diseño de la malla	16				
	3.3. Condiciones de contorno	17				
	3.3.1. Límites laterales	18				
	3.3.2. Cauces superficiales	18				
	3.3.3. Recarga	19				
	3.4. Condición inicial \ldots	24				
	3.5. Parametros hidraulicos	25				
	3.6. Bombeos	25				
	3.0.1. Bombeos para regadio	25 20				
	5.0.2. Dombeos para abastecimiento urbano e industriar	29				
4.	Calibración del modelo	31				
	4.1. Calibración en régimen no influenciado	31				
	4.1.1. Calibración de las condiciones de contorno	32				
	4.1.2. Calibración de las propiedades físicas del lecho del río Jucar	33				
	4.2. Calibración en regimen influenciado	35				
	4.2.1. Calibración de las condiciones de contorno	30				
	4.2.2. Calibración de las propiedades físicas de las unidades hidrogeológicas	37				
	4.2.5. Cambración de las propiedades físicas de las unidades indrogeológicas	39				
5.	Análisis de los resultados del modelo calibrado					
	5.1. Kegimen no influenciado	47				
	5.1.1. Entradas, salidas y variables de control	48				
	 D.1.2. Balance de masa 5.1.2. Deleción entre el río en el confí 	48				
	$0.1.3.$ Relation entre el río y el acunero \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots	32				

	5.2.	Régim	en influenciado	53					
		5.2.1.	Entradas, salidas y variables de control	53					
		5.2.2.	Balance de masa	53					
		5.2.3.	Relación entre el río y el acuífero	55					
6.	Pre	diccion	ies	59					
	6.1.	Definio	ción de escenarios	59					
	6.2.	Result	ados de la predicción	60					
		6.2.1.	Balance de masa	60					
		6.2.2.	Evolución del almacenamiento	62					
		6.2.3.	Relación entre el río y el acuífero	64					
		6.2.4.	Evolución de la piezometría	65					
7.	Conclusiones 71								
	7.1.	Conclu	nsiones	71					
	7.2.	En res	umen	73					

Índice de figuras

1.1.	Esquema del protocolo seguido durante el proceso de modelización del SMO (mo- dificado de Anderson y Woessner (1992)).	2
2.1.	Localización del SMO.	7
2.2.	Distribución de la temperatura entre los años hidrológicos $1940/41$ y $2009/10$ en	
	la estación meteorológica de Albacete (Los Llanos).	8
2.3.	Distribución de la precipitación entre los años hidrológicos 1940/41 y 2009/10 en	0
24	L'imites de la zone modelizade	0
2.4. 9.5	Mapa geológico simplificado del SMO	9 11
2.0.26	Cortos geológicos del SMO	11
2.0.	Dominios hidrogeológicos del SMO	11 19
2.1.	Mapa interpolado de nivoles niezométricos del SMO en 1075	12
2.0.	Mapa interpolado de inveles plezoinetricos del SMO en 1975	19
3.1.	Discretización horizontal del SMO.	16
3.2.	Esquema 3D del SMO.	17
3.3.	Condiciones de contorno de la zona modelizada	18
3.4.	Esquema seguido en MODFLOW para implementar una condición de contorno	
	de río.	19
3.5.	Evolución anual de la recarga en el SMO entre los años hidrológicos 1940/41 a	
	2009/10	20
3.6.	Localización de los ríos Jardín y Lezuza y del Canal de María Cristina	21
3.7.	Vista del río Jardín.	21
3.8.	Vista del río Lezuza.	22
3.9.	Vista del Canal de María Cristina.	22
3.10.	Mapa de cultivos de regadío clasificados según dominios hidrogeológicos	24
3.11.	Valores de las componentes horizontales de la conductividad hidráulica para cada	
	una de las capas del modelo.	26
3.12.	Valores del coeficiente de almacenamiento para cada una de las capas del modelo.	27
3.13.	Localización de los pozos de bombeo para regadío y para abastecimiento urbano	
	e industrial.	28
3.14.	Relación entre el número de habitantes y el consumo urbano e industrial en el	
	entorno de la Mancha Oriental para el año 2002 (Fuente: Aguas de Castilla–La	
	Mancha)	29
4.1.	Condiciones de contorno del modelo.	32
4.2.	Tramos en los que se dividió el río Júcar en el modelo	33
4.3.	Caudales en el tramo 1 del río (desde el embalse de Alarcón hasta la estación de	
	atoros de El Picazo).	34
4.4.	Caudales en el tramo 2 del río (desde la estación de aforos de El Picazo hasta la	<u> </u>
	de Los Frailes).	34
4.5.	Caudales en el tramo 3 del río (desde la estación de aforos de Los Frailes hasta	<u> </u>
	la de Alcala del Júcar).	35

4.6.	Caudales en el tramo 4 del río (desde la estación de aforos de Alcalá del Júcar	~~
	hasta la salida del modelo).	35
4.7.	Condición de contorno en el límite con la Mancha Occidental y localización del piezómetro utilizado para su calibración en régimen influenciado.	36
4.8.	en el límite con la Mancha Occidental en régimen influenciado.)	37
4.9.	Caudales diferenciales simulados en el tramo 1 del río (desde el embalse de Alarcón hasta la estación de aforos de El Picazo) en régimen influenciado	37
4.10.	Caudales diferenciales aforados y simulados en el tramo 2 del río (desde la estación de aforos de El Picazo hasta la de Los Frailes) en régimen influenciado.	38
4.11.	Caudales diferenciales aforados y simulados en el tramo 3 del río (desde la estación de aforos de Los Frailes hasta la de Alcalá del Júcar) en régimen influenciado	38
4.12.	Caudales diferenciales simulados en el tramo 4 del río (desde la estación de aforos	00
4.13.	de Alcala del Jucar hasta la salida del modelo) en regimen influenciado Localización de los piezométricos cuyos ajustes se muestran en las figuras siguientes.	39 40
4.14.	Evolución de los niveles piezométricos en 4 piezómetros del Dominio Central	41
4.15.	Evolución de los niveles piezométricos en 4 piezómetros del Dominio Moro-Nevazos.	42
4.16.	Evolución de los niveles piezométricos en 4 piezómetros del Dominio Septentrional.	43
4.17.	Evolución de los niveles piezométricos en 4 piezómetros del Dominio Salobral-Los Llanos	44
4 18	Evolución de los niveles piezométricos en 4 piezómetros cercanos al río	45
4.19.	Evolución de los niveles piezométricos en 3 piezómetros de medida continua	46
5.1.	Evolución del almacenamiento del acuífero para el periodo 1940/41-1979/80 en rágimon no influenciado	50
5.2.	Evolución del almacenamiento del acuífero para el periodo 1980/81-2009/10 en	50
5.3.	Evolución de las componentes del balance hídrico para el periodo 1940/41-1979/80	50
5.4.	en régimen no influenciado	51
	en régimen no influenciado.	51
5.5.	Evolución del almacenamiento del acuitero para el periodo 1980/81-2009/10 en régimen influenciado.	55
5.6.	Evolución de las componentes del balance hídrico para el periodo 1980/81-2009/10 en régimen influenciado.	55
5.7.	Caudales diferenciales anuales entre las estaciones de aforo de El Picazo y Al- calá del Júcar durante el periodo 1984-2005	56
5.8.	Relación entre las extracciones de aguas subterráneas y la detracción de los cauda-	00
	les del río (arriba) y entre los caudales detraídos y la variación de almacenamiento (abajo).	57
5.9.	Relación entre los niveles piezométricos y el lecho del río para los años 1985, 1995 y 2005	57
6.1.	Evolución del almacenamiento del acuífero para el periodo $1980/81$ a $2026/27$	ഭാ
6.2.	Evolución del almacenamiento del acuífero para el periodo 1980/81 a 2026/27	02
6.3.	para el escenario 2	63
64	para el escenario 3	63
0.4.	para el escenario 4	63

6.5.	Evolución del almacenamiento del acuífero para el periodo $1980/81$ a $2026/27$	
	para el escenario 5	64
6.6.	Evolución de los niveles piezométricos en 4 piezómetros del Dominio Central	66
6.7.	Evolución de los niveles piezométricos en 4 piezómetros del Dominio Moro-Nevazos.	67
6.8.	Evolución de los niveles piezométricos en 4 piezómetros del Dominio Septentrional.	68
6.9.	Evolución de los niveles piezométricos en 4 piezómetros del Dominio Salobral-Los	
	Llanos	69
6.10.	Evolución de los niveles piezométricos en 4 piezómetros cercanos al río	70

Índice de tablas

3.1.	Valores estimados de los retornos de riego y las pérdidas en los bombeos a partir de las dotaciones brutas y las superficies cultivadas para cada año desde 1975 hasta 2009 según el tipo de cultivo	23
5.1.	Balance de la masa de agua para el periodo 1940/41-1979/80 en régimen no influenciado.	49
5.2.	Balance de la masa de agua para el periodo 1980/81-2009/10 en régimen no influenciado	40
53	Balance de la masa de agua para el periodo 2008/09 en régimen no influenciado	49
5.4.	Balance de la masa de agua para el periodo 2009/10 en régimen no influenciado.	49
5.5.	Relación entre el río y el acuífero para el periodo 1940/41-1979/80 en régimen no	
	influenciado	52
5.6.	Relación entre el río y el acuífero para el periodo $1980/81\text{-}2009/10$ en régimen no	
	influenciado	52
5.7.	Relación entre el río y el acuífero para el periodo 2008/09 en régimen no influenciado.	52
5.8. 5.0	Relacion entre el rio y el acuitero para el periodo 2009/10 en regimen no influenciado.	52
5.9.	ciado	54
5.10	Balance de la masa de agua para el periodo 1980/81-2009/10 en régimen influen-	01
	ciado	54
5.11	. Balance de la masa de agua para el periodo 1980/81-2009/10 en régimen influen-	
	ciado	54
5.12	. Relación entre el río y el acuífero para el periodo $1980/81-2009/10$ en régimen	
F 19		56
5.13 5.14	Relación entre el río y el acuífero para el periodo 2008/09 en regimen influenciado.	56
0.14	. Relacion entre el rio y el acunero para el periodo 2009/10 en regimen initienciado.	50
6.1.	Balance de la masa para el periodo 1980/81 a 2027/28 para el escenario 1	61
6.2.	Balance de la masa para el periodo 1980/81 a 2027/28 para el escenario 2	61
6.3.	Balance de la masa para el periodo 1980/81 a 2027/28 para el escenario 3	61
6.4.	Balance de la masa para el periodo 1980/81 a 2027/28 para el escenario 4	61
6.5.	Balance de la masa para el periodo 1980/81 a 2027/28 para el escenario 5	62
0.0.	Relacion entre el río y el acultero para el periodo $2010/11-2026/27$ para el esce-	64
67	Relación entre el río y el acuífero para el periodo 2010/11-2026/27 para el esce-	04
0.1.	nario 2	64
6.8.	Relación entre el río y el acuífero para el periodo 2010/11-2026/27 para el esce-	-
	nario 3	65
6.9.	Relación entre el río y el acuífero para el periodo $2010/11\hbox{-}2026/27$ para el esce-	
	nario 4	65
6.10	. Relación entre el río y el acuífero para el periodo $2010/11-2026/27$ para el esce-	~~
	nario 5	60

Resumen

El Sistema de Acuíferos de la Mancha Oriental (SMO) está localizado en el extremo este de la Llanura Manchega y pertenece en su totalidad a la cuenca hidrográfica del río Júcar. El desarrollo socioeconómico de la región durante los últimos 30 años se ha llevado a cabo gracias a la explotación intensiva de los recursos hídricos subterráneos para abastecer los cultivos de regadío (más de 70.000 ha). Los bombeos de agua subterránea han provocado un continuo descenso de los niveles piezométricos y una reducción de la descarga del sistema al río Júcar.

Para la valoración, cuantificación y predicción espacio-temporal de las interacciones ríoacuífero, y la influencia que sobre ellas tienen los bombeos, se realizó una modelización numérica del flujo subterráneo en 3D utilizando el código MODFLOW (McDonald y Harbough, 1988). La zona de estudio, que ronda los 7000 km², fue discretizada horizontalmente en celdas cuadradas de 1 km de lado. Verticalmente se representó un sistema que cuenta con tres unidades hidrogeológicas acuíferas separadas entre sí por tres unidades semipermeables. Todo el sistema se asienta sobre una capa impermeable. Desde el punto de vista temporal, el modelo se definió para un periodo que va desde el año hidrológico 1940-1941 hasta el 2009-2010. Dado que la explotación a través de los bombeos comienza en los 80, dicho periodo fue dividido en dos partes. Una primera denominada "régimen no influenciado" que va desde el año 1940-1941 hasta el 1979-1980, y una segunda denominada "régimen influenciado" que va desde el año 1980-1981 hasta el 2009-2010. En el primero no hay bombeos, en el segundo sí. A lo largo de los años de simulación la escala de discretización temporal es el mes.

Los límites del modelo son todos definidos como impermeables excepto la zona que limita con la cuenca del río Guadiana y la zona de los ríos Jardín y Lezuza. En estas dos últimas regiones se sabe que hay flujos de agua superficial y/o subterránea que entran al SMO. Otras entradas al modelo vienen dadas por la recarga por infiltración de agua de lluvia, por infiltración desde cauces superficiales y por retornos de riego. Las salidas de agua del sistema de acuíferos en régimen no influenciado coinciden con los caudales drenados por el río Júcar. En régimen influenciado las salidas más importantes son los bombeos de agua subterránea.

El proceso de calibración comenzó por las condiciones de contorno y las propiedades físicas del lecho del río, las cuales fueron calibradas en régimen no influenciado. Para las primeras se buscó garantizar los flujos laterales entrando al modelo y para las segundas los caudales circulando por el río Júcar. En cuanto a las propiedades físicas de las unidades hidrogeológicas, se hizo una asignación previa de valores en función de información geológica y de ensayos de bombeos. Estos últimos, se modificaron en el régimen influenciado para reproducir las alturas piezométricas en algunos puntos de medida. Ante cualquier modificación realizada en régimen influenciado, se comprobaba que el modelo seguía funcionando correctamente en régimen no influenciado. En caso contrario se recalibraba el régimen no influenciado y así sucesivamente hasta conseguir una situación apta, dentro de ciertos límites, para ambos regímenes de funcionamiento.

Con el modelo calibrado se procedió a realizar diversos balances de masa para evaluar el comportamiento del sistema. Todos ellos son consistentes. Se observa que el modelo reproduce con un margen de error aceptable la situación real, tanto en lo que a los caudales circulando por los distintos tramos del río corresponde como a las alturas piezométricas registradas en campo. La conclusión más importante de esta parte del estudio es que, como se sospechaba, el acuífero se ha venido vaciando desde los 80 hasta los años hidrológicos 2006-2007 y 2007-2008, a partir de los cuales se ha conseguido una situación en la que la recarga es casi idéntica a las extracciones,

con la consiguiente estabilización del vaciado del acuífero. En los dos últimos años hidrológicos (2008-2009 y 2009-2010), el almacenamiento comienza a crecer.

También se plantearon 5 escenarios de bombeo para predecir el comportamiento del sistema hasta el año 2027. Como estos escenarios suponen todos unos bombeos importantes y no se incrementan las entradas al sistema, la tendencia mostrada en la evolución del almacenamiento es negativa, aumentando la tasa de vaciado del acuífero según crece el valor medio anual de los bombeos.

Los resultados obtenidos han permitido tener el conocimiento más detallado hasta la fecha del comportamiento del SMO y la distribución espacio-temporal de sus relaciones con el río Júcar.

Introducción

Por iniciativa de la Oficina de Planificación Hidrológica (OPH) de la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ) y de la Junta Central de Regantes de la Mancha Oriental (JCRMO), en mayo de 2007 se comienza a desarrollar una colaboración entre estos organismos y los Grupos de Hidrogeología de las Universidades Politécnica de Valencia (UPV) y de Castilla La Mancha (UCLM), para la realización de un modelo de flujo subterráneo de los acuíferos de la Mancha Oriental y sus relaciones con el río Júcar. Los resultados de la primera y segunda parte de las investigaciones llevadas a cabo fueron documentados en Sahuquillo et al. (2008) y Cassiraga et al. (2011), respectivamente. En este informe se presentan los resultados de un tercer periodo de trabajo que comenzó en septiembre de 2011, actuando la empresa TRAGSATEC como parte contratante, siendo la CHJ y la JCRMO los entes interesados.

1.1. Objetivo

El desarrollo socioeconómico que ha experimentado la Mancha Oriental desde los años 80 se ha debido a la intensa explotación de los recursos hídricos subterráneos. Estos recursos se han destinado al abastecimiento urbano, al uso industrial y a la irrigación de los cultivos de regadío. Existe una superficie regable de unas 100.000 ha de cultivos herbáceos pero debido a la gestión del agua, se están regando actualmente 78.000 ha (ERMOT). Además hay que considerar la superficie ocupada por viña en regadío que oscila entre 15.000 y 20.000 ha. Las extracciones, estimadas por Estrela et al. (2004) en 406 hm³/año, se traducen en un descenso continuado de los niveles piezométricos que ha traído ya consecuencias negativas en la calidad y la cantidad de los recursos subterráneos disponibles. En efecto, los descensos del nivel piezométrico, muy significativos en determinadas zonas, han provocado una disminución de los aportes del acuífero al río Júcar, que actúa en ocasiones como dren del acuífero de la Mancha Oriental.

El objetivo fundamental de este trabajo fue elaborar un modelo numérico que estudie el comportamiento global del SMO y analice de la forma más rigurosa posible las relaciones ríoacuífero y la influencia de los bombeos para riegos en los caudales del río Júcar. El modelo construido debía servir como base, entre otras cuestiones, para el mejor conocimiento de las masas de agua del ámbito del estudio y para la mejora de la gestión de los recursos hídricos de la Mancha Oriental prevista en el Plan Hidrológico del Júcar. Para alcanzar este objetivo se propuso seguir un protocolo similar al que se esquematiza en la figura 1.1.



Figura 1.1. Esquema del protocolo seguido durante el proceso de modelización del SMO (modificado de Anderson y Woessner (1992)).

1.2. Justificación

Durante los últimos 30 años se ha producido una transformación socioeconómica en el SMO que se ha debido, en gran medida, al desarrollo del regadío gracias al uso generalizado de las aguas subterráneas. En la actualidad se extraen del SMO unos 406 hm³/año de agua subterránea de los cuales el 98 % se utilizan para la agricultura de regadío (Estrela et al., 2004). El volumen extraído no es compatible con el valor de los recursos disponibles de agua subterránea estimados en 320 hm³/año por el Plan Hidrológico del Júcar (CHJ, 1998). Esta situación está provocando dos impactos importantes. Por un lado, un descenso continuado del nivel piezométrico regional, y por otro, una reducción de la descarga del acuífero al río Júcar. Existen dudas sobre el valor de las pérdidas de caudal del río en los diversos tramos además de sobre el tipo de relación entre el río y el acuífero.

La cuenca del río Júcar fue designada en 2002 cuenca piloto para la implantación de la Directiva Marco del Agua (DMA). El principal objetivo de esta directiva es que las masas de agua (tanto subterránea como superficial) alcancen el buen estado (cuantitativo y cualitativo) antes del año 2015, protegiendo y evitando su deterioro. Estrela et al. (2004) concluyen, en el informe sobre el artículo 5 de la DMA, que el SMO muestra un mal estado cuantitativo y se encuentra en riesgo de no alcanzar los objetivos medioambientales fijados antes del año 2015.

El mal estado del SMO junto con la pertinaz sequía que padece la cuenca del Júcar ha llevado recientemente a la CHJ a tomar medidas en el tramo medio del río. Aunque los agricultores se autoimponen importantes restricciones sobre sus propios consumos, la CHJ puso en marcha, en las campañas de riegos de 2007 y 2008, una Oferta Pública de Adquisición de Derechos de Agua (OPAD). La OPAD tiene como objeto lograr una reducción en los usos del agua con fines medioambientales sobre la base de tres consideraciones: 1) el poco volumen de agua almacenado en los embalses de cabecera (Embalse de Alarcón), 2) las malas expectativas de las precipitaciones para algunos años hidrológicos y 3) la necesidad de garantizar unas condiciones de caudal mínimo en el río Júcar.

Tanto para la elaboración del informe presentado por Estrela et al. (2004) como la elección del perímetro de realización de la OPAD se ha utilizado la información científica acumulada en la última década y en especial en los últimos años, a través de proyectos de investigación europeos y nacionales, así como, de la elaboración de artículos científicos y tesis doctorales (véase Sanz (2005)). Por todo ello, el SMO representa una zona piloto idónea para el desarrollo de este tipo de modelos que ayuden en la gestión sostenible y en la toma de decisiones respecto a los recursos hídricos. La puesta a punto de herramientas de gestión que hagan compatibles la explotación de los recursos hídricos subterráneos con el mantenimiento ecológico de los ecosistemas superficiales asociados debe ser un resultado a alcanzar en los proyectos que abordan esta materia.

A la luz de lo dicho anteriormente este trabajo se propone: 1) profundizar en el conocimiento de los mecanismos de interacción río-acuífero desde el lecho del río, la llanura aluvial, la zona no saturada y el acuífero, prestando especial atención al balance hídrico en la capa de suelo, modelizando su comportamiento; 2) proporcionar un modelo de estimación de intercambio de agua entre el río y el acuífero a una escala temporal mensual y con una escala espacial local y a nivel de sistema hidrogeológico o cuenca; y 3) convertirse en una herramienta útil para la planificación y gestión sostenible de recursos hídricos a escala regional, especialmente en zonas áridas o semi-áridas.

Para alcanzar estos fines es necesario disponer de una descripción detallada y sinóptica de la zona de estudio, tener un conocimiento profundo de los mecanismos naturales de interacción ríoacuífero lo que supone caracterizar la heterogeneidad de las conductividades hidráulicas del lecho del río, los sedimentos fluviales asociados y el propio acuífero, así como la geometría y fisiografía del río. Además, la precisión requerida hace necesario el uso de un Sistema de Información Geográfica (SIG) que permita integrar en el modelo información tan diversa como son datos de Observación de la Tierra (OT) (superficies de cultivo de regadío y por tanto volúmenes de agua consumidos), datos geológicos (estructura de los acuíferos), datos hidrogeológicos (piezometría, parámetros hidráulicos, etc.), y datos hidrológicos (precipitación, evapotranspiración, aforos, recarga, etc.).

1.3. Antecedentes

Son varios los organismos que han estudiado la hidrogeología del SMO con el fin de llevar a cabo una correcta gestión y planificación de los recursos hídricos. Entre ellos se encuentran la Dirección General de Obras Hidráulicas (DGOH), el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y la CHJ los cuales han elaborado trabajos en la zona de estudio tales como IGME (1979, 1980); DGOH (1988, 1993); CHJ (1999) y referencias incluidas y Font (2004), entre otros.

En relación a la modelización matemática del SMO, se han realizado hasta la fecha tres modelos de simulación de flujo subterráneo. El primer modelo fue elaborado por el IGME en 1984 en el marco del proyecto titulado "Modelo matemático de los acuíferos de Albacete" (IGME, 1984). Este modelo fue el antecedente directo del modelo confeccionado cuatro años después por la empresa INTECSA dentro de los trabajos del proyecto titulado "Estudio de la explotación de aguas subterráneas en el acuífero de la Mancha Oriental y su influencia sobre los caudales del río Júcar" (DGOH, 1988). Se trató de un modelo en diferencias finitas formado por una malla de dimensiones variables cuya celda de mayor tamaño era de 12 por 18 km² y la menor de 3 por 3 km². La superficie modelizada fue de 6370 km². En sentido vertical el modelo tenía tres capas. El software utilizado fue el desarrollado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) (Trescott, 1975). El periodo de simulación fue desde 1974 hasta 1986, con un paso de tiempo de seis meses.

En 1993 se actualizó el modelo ampliando el periodo de simulación hasta el año 1990-1991 en el marco del proyecto "Estudio de seguimiento del impacto de las extracciones de agua subterránea en los acuífero de la Mancha Oriental y los caudales del río Júcar" (DGOH, 1993). En esta ocasión, el objetivo fue el de mejorar el conocimiento regional de la evolución de los niveles del acuífero y particularmente las relaciones de éstos con los caudales descargados por el río Júcar. En consecuencia está calibrado para ajustarse a la variación de drenaje al río y a la evolución piezométrica derivada del mismo. La última calibración del modelo con nuevos datos se intentó realizar dentro del proyecto GESMO (Martín de Santa Olalla, 1997; Calera et al., 1999).

La revisión crítica de los resultados de este primer modelo puso de manifiesto carencias importantes en el conocimiento del SMO. Un modelo mejor que los anteriores debía incluir una correcta cuantificación de las extracciones subterráneas tanto en el tiempo como en el espacio, una definición de las distintas unidades hidrogeológicas, estableciendo las correspondientes condiciones de contorno y las relaciones entre ellas, una aproximación en la cuantificación de los parámetros hidrogeológicos de las diferentes unidades, estableciendo el sistema de flujo en cada una de ellas, y una cuantificación rigurosa de la recarga en el espacio y en el tiempo. Todo ello se ha ido estudiando de forma prolongada en el tiempo, mediante proyectos de Investigación y Desarrollo (I+D) o a través de la elaboración de tesis doctorales, efectuadas principalmente por la UCLM, la Universidad Complutense de Madrid (UCM) y la UPV.

En relación con la cuantificación de las extracciones de aguas subterráneas, el avance en las técnicas de teledetección ha provocado que desde finales de los años 90, la UCLM realice un seguimiento temporal de las superficies de riego (Convenio ERMOT y su validación en el Proyecto EAST (ref. PBI05-012)) que, combinado con los datos de dotaciones de riego que proporciona el Servicio de Asesoramiento de Riegos de Albacete (SARA), permite disponer de información contrastada de las extracciones de agua subterránea del sistema. Respecto a la geometría de las unidades acuíferas y sus parámetros hidrogeológicos, existen muchos estudios del IGME, la DGOH y la CHJ, que Sanz (2005) recoge y sintetiza en su tesis doctoral "Contribución a la caracterización geométrica de las unidades hidrogeológicas que integran el sistema de acuíferos de la Mancha Oriental", y que aporta la información de los trabajos hidrogeológicos y datos del inventario de puntos de agua de los distintos acuíferos. En lo referente a la distribución espacio-temporal de la recarga, el tema ha sido estudiado en detalle y se dispone de datos de recarga por infiltración de agua de lluvia procedente de los modelos SIMPA (Ruiz, 1998, 1999), HYDROMORE (Rubio et al., 2007) y PATRICAL (Pérez-Martín, 2005). En este trabajo se utilizaron los valores calibrados con el último de dichos modelos.

Una revisión de todos estos nuevos datos supuso el diseño del segundo modelo matemático de flujo, que tenía por fin servir como herramienta para simular diferentes escenarios que condujeran a las tomas de decisión en lo referente a la gestión de las aguas del SMO. Dicho modelo se implementó en 2004 en el marco del ejercicio de fin de carrera de Enrique Font titulado "Colaboración en el desarrollo y aplicación de un modelo distribuido de flujo subterráneo de la Unidad Hidrogeológica 08.29 Mancha Oriental, en las provincias de Albacete, Cuenca y Valencia" (Font, 2004), con el apoyo de la OPH de la CHJ. En este trabajo se modeliza el sistema de una manera más detallada que en el modelo anterior, donde se simula el funcionamiento del acuífero y sus relaciones con el río Júcar durante un periodo de sesenta años, mucho antes de comenzarse la explotación intensa de las aguas subterráneas. Los pasos de tiempo son mensuales. En este caso el sistema modelizado fue discretizado en celdas de 1 km de lado. En total conforman una malla de 126 columnas por 131 filas con una extensión de más de 7000 km². La discretización verti-

cal fue de 4 capas paralelas a la superficie del terreno donde se introdujeron las características hidráulicas de los materiales geológicos. El código utilizado para resolver la ecuación de flujo fue MODFLOW (McDonald y Harbough, 1988).

Dos años después, aparece el tercer modelo matemático de la región "Modelo matemático de flujo de la Unidad Hidrogeológica 08.29, Mancha Oriental" (IGME, 2006), donde se toman los mismos datos que el modelo anterior, simulando escenarios con el objetivo de evaluar los efectos de las sustituciones de bombeos en diferentes áreas del sistema.

Con toda esta información y a petición de las partes contratantes el punto de partida de la investigación llevada a cabo por la UPV y la UCLM fue el modelo existente en la OPH realizado por Enrique Font (Font, 2004). Los resultados de la primera y segunda fase de dicha investigación fueron documentados en Sahuquillo et al. (2008) y Cassiraga et al. (2011), respectivamente, informes que constituyen los últimos antecedentes en los trabajos correspondientes al estudio del SMO.

2 Modelo conceptual

Este capítulo presenta una descripción general del sistema modelizado comenzando con su localización y comentando las características climáticas de la zona estudiada. El contexto hidrogeológico es descrito con cierto detalle y un modelo conceptual sustentado en lo anterior es propuesto.

2.1. Localización del área de estudio

El SMO, también denominado Unidad Hidrogeológica 08.29, se sitúa en el sudeste de la Península Ibérica, en el extremo oriental de la llanura Manchega y pertenece en su totalidad a la cuenca del río Júcar (ver figura 2.1). Tiene una superficie de 7260 km² siendo uno de los acuíferos más extensos de España. Actualmente este sistema suministra agua para regar más de 1000 km² y atiende las demandas de agua potable de más de 275000 personas.



Figura 2.1. Localización del SMO.

2.2. Contexto hidrológico

La zona presenta un clima mediterráneo continental semiárido. En verano la temperatura media mensual es de 22 °C y en invierno de 6°C. En la figura 2.2 se puede ver la distribución de las temperaturas durante el periodo entre los años hidrológicos 1940/41 y 2009/10 en la estación meteorológica de Albacete (Los Llanos). La precipitación media anual es de 350 mm y varía entre 280 mm al sur y 550 mm al norte. En los años más secos la precipitación media es del orden de 150 mm, y en los años húmedos puede alcanzar los 750 mm. En la figura 2.3 se puede ver la distribución de la precipitación durante el periodo entre los años hidrológicos 1940/41 y 2009/10 en la estación meteorológica de Albacete (Los Llanos).



Figura 2.2. Distribución de la temperatura entre los años hidrológicos 1940/41 y 2009/10 en la estación meteorológica de Albacete (Los Llanos).



Figura 2.3. Distribución de la precipitación entre los años hidrológicos 1940/41 y 2009/10 en la estación meteorológica de Albacete (Los Llanos).

2.3. Contexto hidrogeológico

Geomorfológicamente la zona de estudio está constituida por grandes depresiones de edad intramiocena rellenas por materiales posteriores (Terciario-Pliocuaternario) que conservan su disposición horizontal, causa del relieve prácticamente plano de la zona. Esta alta llanura (700 m de altitud media sobre el nivel del mar), se encuentra bordeada por suaves relieves e interrumpida únicamente por el valle excavado por la acción remontante del río Júcar, principal curso fluvial que atraviesa el sistema.

2.3.1. Límites del sistema

El primer paso para la propuesta de un modelo conceptual es la definición de los límites del área de interés. Siempre que se pueda es recomendable que coincidan con los límites hidrogeológicos naturales. En algunas situaciones esto no es posible y se debe restringir el área de estudio a una menor que la que determinan las condiciones hidrogeológicas naturales. De todas formas siempre será necesario determinar los límites reales del sistema para definir el modelo conceptual. En el SMO se han conseguido unos límites que coinciden con los naturales en casi todo su contorno.

En la figura 2.4 se presentan los límites del SMO según Sanz (2005). El límite norte engloba las



Figura 2.4. Límites de la zona modelizada.

cabeceras del río Valdemembra, el arroyo Ledaña y afluentes del Júcar por la margen izquierda. El límite noreste en principio englobaba la cuenca vertiente al río Cabriel aunque este río vertiera sus aguas al Júcar en el límite del sistema hidrogeológico. El límite propuesto en este trabajo consiste en delimitar la divisoria de aguas entre el Júcar y el Cabriel por donde el flujo existente tanto a nivel subterráneo como superficial es nulo. Ese límite está representado por los afloramientos arcillosos y yesíferos del Triásico superior en "Facies Keuper". Es decir que se propone un límite coherente con los materiales presentes en los bordes del sistema. En el límite sudeste se incorpora al SMO una parte importante de la cuenca vertiente del río Reconque, por tanto el límite es la divisoria de la subcuenca de este río. El límite noroeste es la divisoria de aguas superficiales entre el río Guadiana y el río Júcar, la cual no coincide con la divisoria de las aguas subterráneas. De acuerdo a la piezometría de la zona se observa como la divisoria de aguas subterráneas se desplaza unos 10 km hacia la Mancha Occidental sufriendo cambios en el tiempo. Con el límite sur ocurre algo similar a lo ocurrido en el límite noroeste, siendo el límite del sistema la divisoria superficial entre la cuenca del río Segura y el Júcar. El límite sudoeste es en la mayoría de los estudios una línea recta, cuando en realidad el alineamiento de los materiales arcillosos de baja permeabilidad no es lineal. En este estudio se han digitalizado los afloramientos impermeables y se han considerado como el límite sudoeste del SMO.

2.3.2. Unidades hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas (UH) o hidroestratigráficas son unidades geológicas de similares propiedades hidrogeológicas. Dicho concepto es muy útil para la simulación de sistemas geológicos a escala regional. Su determinación está ligada al conocimiento de la historia deposicional del sistema que se quiere modelizar. Para su determinación se utiliza información que incluye mapas geológicos y cortes verticales del terreno, registros en pozos y datos sobre las propiedades hidrogeológicas de subsuelo. La definición del modelo conceptual descansa en buena medida en una correcta definición de las UH.

Dentro del SMO, Sanz (2005) agrupa las diferentes secuencias sedimentarias en nueve UH. Los acuíferos importantes en cuanto a su extensión lateral y potencia corresponden con la UH7, presente en todo el SMO, la UH3, que se localiza en la mitad nororiental, y la UH2, que ocupa el sector central del sistema. Estas unidades carbonatadas están separadas por acuitardos/acuífugos como los que constituyen la UH6, UH5, UH4 y UH1. La UH8 compuesta por margas, arcillas y yesos conforma el impermeable de base y el límite SO de la zona de estudio (IGME, 1980; DGOH, 1988; Sanz, 2005). Las UH mesozoicas se encuentran afectadas por procesos de fracturación y plegamiento de diferente magnitud e intensidad que dan lugar a las elevaciones más importantes del SMO (Estribaciones de la Cordillera Ibérica, Macizo de Carcelén, Estribaciones del Prebético externo, Cobertera Tabular de la Meseta). Sobre el paleorelieve mesozoico deformado se disponen horizontalmente la UH2 y UH1 que configuran la Llanura de Albacete-Cuenca.

La UH7 está formada por calizas y dolomías fracturadas y karstificadas de edad Jurásico medio. Presenta una potencia que oscila entre los 100 y los 500 m. La UH3 está constituida por calizas y dolomías fracturadas y karstificadas de edad Cretácico superior. Esta unidad tiene una potencia que varía entre 50 y 200 m. La UH2 se denomina tradicionalmente como Acuífero Mioceno Pontiense y está formada por una secuencia alternante de margocalizas y margas (IGME, 1980; CHJ, 1999). La disposición espacial y tridimensional de dichas unidades se encuentra detallada en Sanz (2005) y Sanz et al. (2009). En la figura 2.5 se puede observar un mapa simplificado del SMO y en la figura 2.6 los tres cortes geológicos indicados en la primera.

2.3.3. Dominios hidrogeológicos

Siguiendo a Sanz (2005) el SMO se divide en seis Dominios Hidrogeológicos (DH, ver figura 2.7) no sólo en función de la evolución piezométrica sino también considerando las características geológicas regionales. Los dominios que se definen a continuación comprenden una región que se individualiza por sus características geológicas y presentan un comportamiento hidrogeológico diferente de las adyacentes. Los dominios son: Dominio Septentrional (DS), Dominio Central (DC), Dominio Salobral-Los Llanos (DSL), Dominio Moro-Nevazos (DMN), Dominio Po-



Figura 2.5. Mapa geológico simplificado del SMO.



Figura 2.6. Cortes geológicos del SMO.

zo Cañada (DPC), y Dominio Montearagón-Carcelén (DMN). El grado de conexión hidráulica entre estos dominios es muy variable. La continuidad estratigráfica de los materiales acuíferos y la ausencia de saltos en la piezometría sugieren que existe transferencia de recursos subterráneos entre los dominios DS, DC y DSL (IGME, 1980; Sanz, 2005). Sin embargo, no existe conexión hidráulica entre los dominios DMN, DPC y DMC ni entre estos últimos y los dominios DS, DC y DSL (Sanz et al., 2005). Los datos litoestratigráficos indican que en todos los dominios se encuentra en profundidad la UH8. Esta unidad puede alcanzar potencias de hasta 800 m en el sector oriental del SMO.



Figura 2.7. Dominios hidrogeológicos del SMO.

2.4. Modelo hidrogeológico conceptual

El funcionamiento del SMO está regido por una variada serie de elementos interrelacionados (zonas de recarga y descarga, relación entre unidades acuíferas, relaciones entre éstas con los cursos superficiales, etc). En régimen natural, las zonas de recarga coinciden con los afloramientos mesozoicos de la UH7 y de la UH3 en los bordes del sistema. Estas unidades acuíferas se introducen suavemente bajo la llanura de Albacete-Cuenca gracias a la existencia de fracturas con desplazamiento vertical. Sobre estas UH se disponen discordantes las unidades cenozoicas (UH1 y UH2) que constituyen el relleno terciario de la cuenca del río Júcar. Otra zona de recarga está constituida por los cursos de los ríos Jardín y Lezuza, que ceden sus aportes por infiltración en la llanura. La principal zona de descarga de agua subterránea es el río Júcar. La UH2, que se encuentra en estado libre en toda su extensión, cede de forma natural sus recursos a este río. Según el modelo conceptual de funcionamiento hidrogeológico del SMO las entradas de agua a



Figura 2.8. Mapa interpolado de niveles piezométricos del SMO en 1975.

la UH2 se producen a través de la recarga directa de agua de lluvia y de las descargas desde los acuíferos mesozoicos a través de los materiales semipermeables de la UH1 (IGME, 1980; Sanz, 2005).

Para ilustrar la distribución de los niveles piezométricos y de la relación entre el SMO y el río Júcar, se puede ver en la figura 2.8 el mapa de piezometría para el año 1975. Dicho mapa fue obtenido a partir de considerar 107 datos de alturas piezométricas interpolados por krigeado ordinario. Se puede observar como el río Júcar actúa en ocasiones como dren del acuífero de la Mancha Oriental.

Los estudios hidrogeológicos realizados hasta la fecha no han analizado en detalle los flujos verticales entre las diferentes unidades acuíferas que conforman el sistema hidrogeológico multicapa de la Mancha Oriental. De hecho, en varios de estos trabajos a gran escala, se han modelizado las isopiezas como un conjunto multicapa con objeto de determinar el funcionamiento hidrogeológico general, sin que se pueda determinar el flujo concreto por separado para cada unidad hidrogeológica acuífera.

Por otro lado, tal y como se observa en las evoluciones piezométricas de los puntos de control que miden las diferentes unidades acuíferas, éstas presentan una morfología y una tendencia similar independientemente de la unidad acuífera monitorizada. Sin embargo, no se tienen evidencias para determinar que presenten el mismo potencial hidráulico ya que, no se dispone de puntos de control próximos entre sí con rejilla independiente en cada unidad acuífera.

Según la información geológica recopilada en Sanz (2005), las unidades acuíferas se encuentran separadas entre sí por espesores considerables de materiales impermeables y semipermeables. Por ejemplo, la unidad acuífera del Jurásico (UH7) se encuentra confinada en la mayoría del sistema por los materiales acuífugos del Jurásico superior (UH6) y del Cretácico inferior (UH4) cuya potencia oscila entre los 100 y 300 m. Este hecho confirmaría la desconexión hidráulica entre las diferentes unidades acuíferas.

No obstante, en la parte central del SMO, en las proximidades del río Júcar entre las localidades de La Roda, Tarazona de la Mancha y Cuasiermas, donde las isopiezas están más espaciadas, se presupone una interconexión de fracturas entre los distintos materiales geológicos. Este hecho provoca una descarga de los acuíferos mesozoicos (UH3 y UH7) hacia la unidad acuífera del Mioceno (UH2). Estas descargas se dirigen a través de los materiales semipermeables de la UH1 de forma ascendente hacia la unidad acuífera del Mioceno medio (UH2). Aunque el quimismo de las aguas de las diferentes unidades acuíferas es semejante (bicarbonatadas cálcico magnésicas) se observa un efecto de mezcla en la UH2 en la zona de Cuasiermas.

Ante el desconocimiento real de las complejas inteconexiones que se producen entre los acuíferos mesozoicos y el acuífero del Mioceno, pero demostrada su existencia en la zona de Cuasiermas, se propuso adecuar esta situación para su modelización matemática. Para ello, en la citada zona se aumento la permeabilidad vertical de los materiales de la unidad semipermeable del terciario detrítico UH1 con el objetivo de simular los flujos verticales existentes. Los resultados obtenidos quedan reflejados por el correcto ajuste entre los niveles piezométricos observados y calculados de la zona y por los valores semejantes de los flujos intercambiados entre el río y el acuífero.

B Selección del código y diseño del modelo

En este capítulo se describe todo lo relativo al código utilizado para la solución numérica del modelo matemático y al diseño del modelo. El modelo conceptual previamente definido se debe "traducir" para que el sistema sea modelable. Esto supone, una vez elegido el código a emplear, el diseño de una malla, la selección del paso de tiempo para la simulación, la definición de las condiciones inicial y de contorno, y la asignación de valores preliminares a los parámetros del modelo y a las acciones exteriores.

3.1. El modelo matemático y el código

El movimiento en 3D del agua subterránea a través de un medio poroso saturado, heterogéneo y anisótropo en régimen transitorio es descrito matemáticamente por la siguiente ecuación en derivadas parciales:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t}$$
(3.1)

donde K_{xx} , K_{yy} y K_{zz} son las componentes de la conductividad hidráulica en las direcciones $x, y \neq z$, respectivamente (L/T); h es la altura piezométrica (L); W es un flujo volumétrico por unidad de volumen y se utiliza para representar las fuentes y los sumideros de agua (1/T); $S_s(S/b)$ es el coeficiente de almacenamiento específico (1/L); y t es el tiempo (T). Para encontrar la solución a la ecuación 3.1 es necesario agregar a la misma las condiciones de contorno e inicial. Dicha solución permite conocer la altura piezométrica en función del espacio y del tiempo, es decir, h = h(x, y, z, t).

La solución analítica de la ecuación 3.1 sólo es posible en casos sencillos. En general, se debe recurrir a una aproximación mediante métodos numéricos como los de diferencias finitas o elementos finitos. En este trabajo se utilizó el código MODFLOW (McDonald y Harbough, 1988), el cual resuelve la ecuación 3.1 usando una aproximación en diferencias finitas. En el método de las diferencias finitas el sistema descrito de forma continua por la ecuación 3.1, es sustituido por un número finito de puntos en el espacio y el tiempo, y las derivadas parciales son reemplazadas por diferencias entre los valores de las variables en esos puntos. Este proceso de discretización conduce a un sistema de ecuaciones lineales cuya solución son los valores de la

altura piezométrica para los puntos en el espacio y el tiempo sobre los cuales se ha discretizado el sistema, es decir, h = h(x, y, z, t).

MODFLOW puede simular el flujo en condiciones transitorias en un medio poroso heterogéneo y anisótropo, las capas pueden ser tratadas como confinadas, no confinadas o una combinación de ambas. También incorpora a la simulación acciones exteriores como pozos, recarga, evapotranspiración, drenes y ríos. Los datos de entrada son los parámetros hidráulicos del acuífero y las condiciones inicial y de contorno. La salida del modelo es la altura piezométrica en cada celda aunque también pueden realizarse balances hídricos por zonas. En McDonald y Harbough (1988) se puede consultar con detalle todo lo referente a la implementación de la ecuación 3.1 en diferencias finitas, las condiciones inicial y de contorno, las acciones exteriores y como se encuentra la solución a un problema real.

3.2. Discretización espacio-temporal y diseño de la malla

La zona de estudio fue discretizada en sentido horizontal en celdas cuadradas de 1 km de lado, por lo que se tiene 126 columnas y 131 filas, dando un total de 16506 celdas por cada capa (figura 3.1).



Figura 3.1. Discretización horizontal del SMO.

En sentido vertical, el modelo representa al SMO como un sistema que cuenta con 3 acuíferos (UH2, UH3 y UH7) y 3 unidades semipermeables (UH1, UH4 y UH5-UH6), por lo que consta de 6 capas. La base impermeable la constituye la topografía del techo de la UH8. La geometría del sólido a simular fue derivada a partir de 516 columnas litológicas de los sondeos recopilados en el inventario de puntos de agua. Se han obtenido las cotas del techo y muro de cada capa

definida, estando todas ellas referidas a la superficie topográfica. Con esta información y a partir de los datos de Sanz et al. (2009) se obtuvieron las superficies del techo y muro de las unidades hidrogeológicas acuíferas, capas 2, 4 y 6 en el modelo. Definidas las unidades acuíferas, los "espacios vacíos" entre ellas son los correspondientes a las unidades acuitardas y acuífugas, capas 1, 3 y 5 en el modelo. El método utilizado para la interpolación de puntos que permitió definir las superficies fue el krigeado ordinario. El resultado que se obtiene es la estructura tridimensional del sistema que se esquematiza en la figura 3.2.



Figura 3.2. Esquema 3D del SMO.

La discretización temporal es el mes y el periodo de simulación considerado es desde el año hidrológico 1940/41 hasta el año 2009/10. Más adelante se verá que se realizan varias simulaciones correspondientes a diferentes intervalos dentro del periodo antes citado. Además se harán simulaciones para predecir el comportamiento futuro del sistema que llegarán hasta el año hidrológico 2026/27.

3.3. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno informan al modelo matemático acerca de la interacción entre el sistema analizado y el medio exterior. Para un modelo de flujo son sentencias matemáticas que especifican los valores de la altura piezométrica y/o del flujo de agua en los límites del modelo. Hay tres tipos de condiciones de contorno en un modelo de flujo:

- Condición de Dirichlet, de primer tipo o de borde con una altura piezométrica prescrita.
- Condición de Neumann, de segundo tipo, de borde con un gradiente de la altura piezométrica prescrito o de borde con un flujo prescrito.
- Condición de Cauchy, de tercer tipo, de borde con un flujo dependiente de la altura piezométrica o condición mixta por ser una combinación de las condiciones de Dirichlet y de Neumann.

Cualquier relación que tenga el modelo con el exterior a través de sus contornos puede ser modelada con alguna de las condiciones anteriores. En este modelo se incluirán a través de alguna condición de contorno los siguientes elementos: límites laterales, cauces superficiales y recarga.

3.3.1. Límites laterales

En la figura 3.3 se representan gráficamente los límites del modelo y su condición. Todos los límites son impermeables con excepción de los correspondientes al contacto con la cuenca del río Guadiana y los ríos Jardín y Lezuza donde hay que configurar un cierto flujo entrando al sistema. Para implementar un borde impermeable basta con configurar todas sus celdas como inactivas. Esto garantiza que el flujo que atraviesa un borde de este tipo es nulo. En el caso de que un contorno tenga un flujo prescrito, de acuerdo a la ley de Darcy, hay que calibrar su conductividad hidráulica teniendo en cuenta la altura de agua en él y el flujo que se desea obtener. En el capítulo 4 se explicará con detalle el proceso llevado a cabo para configurar este tipo de contornos.



Figura 3.3. Condiciones de contorno de la zona modelizada.

3.3.2. Cauces superficiales

La relación del río Júcar con el acuífero fue representada a través de una condición de potencial prescrito. Para ello se utilizó el módulo o paquete de río de MODFLOW (RIVER, McDonald y Harbough (1988)). Este módulo se utiliza para simular la interrelación entre los cuerpos de agua superficial y el flujo subterráneo. Los parámetros que necesita el modelo son (ver figura 3.4): a) la cota del fondo del río, b) la cota de la lámina de agua, y c) la conductancia de los materiales existentes en el fondo del cauce.



Figura 3.4. Esquema seguido en MODFLOW para implementar una condición de contorno de río.

La cota del fondo del río se obtuvo mediante nivelación topográfica de una serie de puntos del cauce y la cota de la lámina de agua a partir de la altura existente en las estaciones de aforo operativas. Valores preliminares de la conductancia C del río se calculan utilizando la siguiente expresión:

$$C = \frac{KLW}{M}$$

donde C y K son la conductancia y la conductividad hidráulica de los materiales del fondo del río (L²/T) y (L/T), respectivamente; L y W son la longitud y el espesor del tramo del río (L), respectivamente; y M es el espesor de los materiales del fondo del río (L). En una primera aproximación, los valores de K se obtuvieron a partir de Calver (2001) en función del tipo de material encontrado en el lecho del río (visitas de campo). La longitud L de los tramos de río viene definida por el tamaño de celda (1000 m). Los valores de W se obtuvieron a partir de fotointerpretación de diferentes ortofotos, por ejemplo las disponibles a partir de PNOA (resolución espacial < 0.4 m). Para la estimación del espesor de la capa de materiales en el fondo del río se partió del supuesto de espesor constante igual 0.5 m observado en campo. Los valores de C así obtenidos serán modificados en la etapa de calibración con el fin de reproducir los caudales diferenciales registrados entre pares de estaciones de aforo.

3.3.3. Recarga

Se consideran tres fuentes de recarga de agua superficial: recarga por infiltración de la precipitación, recarga a través de la infiltración de los lechos de los ríos Jardín y Lezuza y recarga por los retornos de riegos.

Precipitación

La recarga directa por infiltración de agua de lluvia es un proceso bien conocido pero su cuantificación espacio-temporal y el análisis de los procesos existentes en la zona no saturada son objeto de gran incertidumbre (Rana et al., 2001). De hecho, la sola inestabilidad climática propia de los climas semiáridos muestra una contrastada variabilidad interanual. Para apreciar ésto, se puede observar en la figura 3.5 la representación gráfica de los valores anuales de recarga para la serie simulada (1940/41-2009/10).



Figura 3.5. Evolución anual de la recarga en el SMO entre los años hidrológicos 1940/41 a 2009/10.

Los valores de recarga utilizados en este modelo fueron dados por la CHJ y calibrados con el modelo PATRICAL (Pérez-Martín, 2005). La resolución temporal de la recarga es el mes y los valores son estimados sobre celdas de 1 km por 1 km. Para su introducción en el modelo se fijaron zonas en las cuales la recarga es homogénea mes a mes. La zonificación utilizada corresponde a los dominios hidrogeológicos definidos en el apartado 2.3.3.

Cauces superficiales

Los ríos Jardín y Lezuza (ver figura 3.6 para su localización), tienen un comportamiento efímero funcionando únicamente cuando la zona hidrogeológica anexa (Unidad Hidrogeológica Jardín-Lezuza) presenta excedentes superficiales. Dichos ríos procedentes del campo de Montiel (SO del área investigada) se pierden por infiltración dentro del SMO, al oeste de la ciudad de Albacete. En las figuras 3.7 y 3.8 se puede ver el aspecto de estos dos ríos.

La determinación de los caudales de infiltración de este tipo de cursos de agua no es fácil puesto que los valores a medir son a veces menores que el margen de error de los aforos. Aún así, según Estrela et al. (2004), los valores de aportes de caudales de estos ríos al SMO suponen entre el 15-20 % de los recursos renovables, por lo que la incertidumbre de sus datos puede suponer importantes efectos sobre aspectos relacionados con la gestión y la conservación medioambiental. En el marco de este proyecto, TRAGSATEC realizó un estudio en la zona (TRAGSATEC, 2010b) y determinó que las entradas al acuífero por infiltración de las aguas superficiales de los ríos Jardín y Lezuza deberían tener un valor medio anual orientativo de 18 hm³ para la serie 1980/81-2009/10. La forma de incorporarlos al modelo matemático fue como si fueran pozos de inyección o recarga en el acuífero. Esta elección se ha debido a la rápida infiltración del agua en estos cauces y su respuesta cuasi-inmediata en los niveles piezométricos.

Otro de los cauces de agua superficial del SMO es el Canal de María Cristina (ver figura 3.6 para su localización y figura 3.9 para su aspecto). Dicho canal se construyó a principios del siglo XIX con el objeto de descargar las aguas de las tierras encharcadas de Ojos de San Jorge, Hoyavacas, Acequión y la laguna del Salobral, dándoles salida al río Júcar. En la actualidad, esta infraestructura sirve como desagüe de las aguas residuales de la ciudad de Albacete. El volumen de agua desalojada puede alcanzar los 15 hm³/año. Estos valores se han obtenido aplicando un



Figura 3.6. Localización de los ríos Jardín y Lezuza y del Canal de María Cristina.



Figura 3.7. Vista del río Jardín.

porcentaje al abastecimiento de agua de la ciudad. Los valores de infiltración del Canal de María Cristina han sido introducidos en el modelo siguiendo las mismas consideraciones y metodología que en los ríos Jardín y Lezuza aunque solo en régimen influenciado, es decir, a partir del año hidrológico 1980/81.



Figura 3.8. Vista del río Lezuza.



Figura 3.9. Vista del Canal de María Cristina.

Retornos de riego

En caso de realizar una simulación en régimen alterado, es decir con bombeos, es necesario considerar los retornos de riego. Para estimarlos se consideró un porcentaje del 10% de las dotaciones brutas aplicadas a cada cultivo. Las dotaciones fueron evaluadas por TRAGSATEC a través de un estudio específico (TRAGSATEC, 2010a). En la tabla 3.1 se puede ver un resumen de los valores utilizados para dicho cálculo.
					Dation of the other					
ł	Frimav F	rera	verai	U	Frimavera-	verano	P · · ·	os م	£	1.1.7
no	Dotación (m ³ /ha/año)	Superficie (ha)	Ketornos (hm ³ /año)	Perdidas (hm ³ /año)						
175	2612	12515	5933	15890	7670	6843	1500	2145	18.3	9.1
920	2602	11013	6005	13939	7709	5527	1500	2145	15.8	7.9
22	2612	12515	5933	15890	7670	6843	1500	2145	18.3	9.1
78	2612	12515	5933	15890	7670	6843	1500	2145	18.3	9.1
621	2658	12900	5876	17841	7644	8159	1500	2145	20.5	10.2
80	2659	13918	5893	19675	7612	8290	1500	2145	21.9	11.0
81	2646	14047	5894	22798	7527	8157	1500	2145	23.6	11.8
82	2654	14151	5732	30557	7463	9209	1500	2145	28.5	14.2
83	2656	15860	5708	40895	7574	8465	1500	2905	34.4	17.2
84	2634	13750	5933	43555	7648	8280	1500	3665	36.3	18.2
85	2595	15210	6045	48379	7657	7380	1500	4926	39.6	19.8
980	2589	18665	5894	54583	7590	7569	1500	5408	43.6	21.8
87	2603	19670	5964	56205	7597	7411	1500	6285	45.2	22.6
88	2650	19047	6005	60622	7600	7285	1500	6285	47.9	24.0
89	2647	20360	6108	57800	7629	6470	1500	6285	46.6	23.3
060	2607	24340	5969	58640	7558	6400	1500	6285	47.1	23.6
160	2579	25025	6009	58285	7585	6372	1500	6285	47.3	23.6
92	2543	27900	5914	58010	7543	6600	1500	6285	47.3	23.7
93	2575	25400	5197	63366	7546	6933	1500	6285	45.6	22.8
94	2912	30676	5530	62606	7597	7747	1500	6285	50.4	25.2
95	2870	37501	6101	46569	7610	7660	1500	6285	45.9	23.0
96	2860	44839	4787	51466	7607	8232	1500	7163	44.8	22.4
26	2526	47908	5293	52790	7471	10500	1500	7564	49.0	24.5
968	2312	47574	5348	49408	7404	12500	1500	7964	47.9	23.9
666	3080	44817	6153	44421	7343	17500	1500	8359	55.2	27.6
000	2983	46397	7043	36444	7453	22315	1500	8510	57.4	28.7
101	3214	34066	6557	30825	7599	15725	1500	9512	44.5	22.3
02	2768	42608	6688	36127	7075	16446	1500	10218	49.1	24.6
03	2916	45851	6268	35113	7383	18021	1500	11137	50.4	25.2
04	2292	46333	5466	34488	6258	12296	1500	11902	39.0	19.5
05	3616	45317	6687	32077	7774	15143	1500	12962	51.6	25.8
900	2411	42725	5229	27607	7970	11867	1500	14048	36.3	18.2
200	2391	42344	5868	17798	0029	9821	1500	14606	29.3	14.7
08	1662	48838	5310	20102	6589	6989	1500	15774	25.8	12.9
60	2442	57205	5698	21400	7112	10119	1500	15774	35.7	17.9
nedio	2657	29537	5885	38630	7470	6976	1500	7032	36.3	18



Además, se consideraron como retornos de riego los excedentes de agua en zonas donde se riega con aguas superficiales. Según CHJ se calcula que se trata de unos $10 \text{ hm}^3/\text{año}$.

Ambos retornos se tratan igual que si fueran una recarga y se suman a la recarga por precipitación en aquellas celdas donde haya cultivos. Ver figura 3.10.



Figura 3.10. Mapa de cultivos de regadío clasificados según dominios hidrogeológicos.

3.4. Condición inicial

La condición inicial establece los valores de la altura piezométrica a partir de los cuales comienza la simulación del sistema en régimen transitorio. Conforme avanza la simulación estas alturas van cambiando y en general convergen hacia los valores solución del modelo matemático planteado. Cuanto más cerca esté la condición inicial de la solución del modelo, menos tiempo tardará el ordenador en realizar la simulación. Una condición inicial mal elegida puede resultar en potenciales erróneos durante un largo periodo de tiempo dependiendo de la capacidad de almacenamiento de los materiales acuíferos.

La condición inicial utilizada en este modelo corresponde al estado de los niveles piezométricos en el año 1975 (Sanz, 2005). Hasta este año el efecto de los bombeos puede considerarse poco importante o despreciable. Dichas alturas pueden verse en la figura 2.8.

3.5. Parámetros hidráulicos

Al tratarse de un modelo distribuido, MODFLOW requiere valores de los parámetros hidráulicos en cada bloque producto de la discretización espacial. Los valores de conductividad hidráulica (K), transmisividad (T), almacenamiento específico (S_s) y retención específica (S_y) son los principales parámetros a considerar, ya que permiten estimar la evolución de los niveles del agua subterránea en el entorno de una captación, la variación de almacenamiento, el caudal de agua subterránea en una sección del acuífero, los tiempos de transporte de contaminantes, el grado de heterogeneidad del acuífero y para este caso de estudio, la parametrización numérica del modelo de flujo subterráneo.

Generalmente, la estimación de estos parámetros requiere de gran cantidad de ensayos de campo (bombeo y slug). En este caso, para caracterizar las unidades hidrogeológicas del SMO se revisó información sobre ensayos de bombeo y datos sobre caudales específicos calculados en el área de estudio (véase CHJ (1999) y Sanz (2005)). Se identificaron 2.480 puntos (sondeos y pozos) en el SMO. En cada punto se examinaron sus características constructivas y se comprobó la ubicación de las zonas de admisión de agua en la posición de la columna litológica. De esta manera, se seleccionaron 323 puntos del inventario pertenecientes a las unidades UH7 y UH2. De ellos sólo 77 puntos poseían pares de datos de transmisividad y caudal específico. En la UH7 se recogieron 64 valores de transmisividad y 200 de caudal específico, y en la UH2 se recopilaron 13 valores de transmisividad y 123 de caudal específico. A partir de los datos obtenidos se asoció una propiedad hidráulica a cada una de las formaciones geológicas en la zona excepto en el caso del acuífero mioceno (UH2) donde se consideró un cierto grado de heterogeneidad en cuanto a su grado de permeabilidad debido al importante volumen de extracciones de agua subterránea que se da en él y a la relación directa que dicha formación mantiene con el río Júcar.

Estos valores preliminares fueron luego modificados durante el proceso de calibración con el objetivo de reproducir las alturas piezométricas en aquellos puntos en los que se disponía de registros. En las figuras 3.11 y 3.12 se pueden ver los mapas con los valores de la conductividad hidráulica horizontal ($K_x = K_y$) y del coeficiente de almacenamiento S para cada una de las capas del SMO después de dicha calibración, respectivamente.

3.6. Bombeos

En este modelo se consideraron dos tipos de bombeos según la demanda atendida: bombeos para regadío y bombeos para abastecimiento urbano e industrial. Los primeros son los más importantes en volumen y en impacto económico, social y sobre el sistema. Estamos hablando de unas extracciones que pueden superar los 400 hm³/año. Los segundos corresponden a las demandas atendidas de alrededor de unas 300.000 personas, más de la mitad en Albacete. En la figura 3.13 se puede observar la localización de los pozos incluidos en el modelo, tanto de regadío como de abastecimiento urbano e industrial.

3.6.1. Bombeos para regadío

En este trabajo las extracciones de agua subterránea se estiman aplicando una metodología basada en teledetección y uso de un sistema de información geográfica cuyos detalles pueden encontrarse en Castaño et al. (2010). La información disponible está constituida por:

- Mapas con la clasificación de cultivos. Se obtienen vía teledetección e informan del tipo de cultivo desarrollado (primavera, verano o primavera-verano) en función del espacio.
- Mapas con la delimitación de las Unidades de Gestión Hídricas (UGH). La definición de UGH fue hecha por la JCRMO y la CHJ y consiste en la caracterización física y administrativa de los aprovechamientos de aguas subterráneas con destino a regadío, u



Figura 3.11. Valores de las componentes horizontales de la conductividad hidráulica para cada una de las capas del modelo.





S

0.0065 0.008 0.04 0.06 0.2

Figura 3.12. Valores del coeficiente de almacenamiento para cada una de las capas del modelo.



Figura 3.13. Localización de los pozos de bombeo para regadío y para abastecimiento urbano e industrial.

otros usos, con asignación a los mismos de los expedientes administrativos que habilitan al uso del agua, en aplicación de lo dispuesto en el Art. 32 del Plan Hidrológico del Júcar (PHJ).

• Mapas con la localización de los pozos de bombeo. Información disponible en la CHJ y la JCRMO.

A partir de dicha información el procedimiento seguido para estimar las extracciones puede resumirse como sigue:

- 1. Se cruza la información acerca de tipo de cultivo y delimitación de UGH. El cruce de estas dos fuentes de información permite disponer de las áreas cultivadas y con que tipo de cultivo en cada UGH.
- 2. Se cruza la delimitación de las UGH con la localización de los pozos. Este cruce permite asociar perforaciones a UGH.
- 3. A partir de la información obtenida en (1) y disponiendo de las dotaciones de cada tipo de cultivo se puede estimar el volumen de agua necesario para llevar a cabo el correcto desarrollo fenológico de las plantas existentes en cada UGH.
- 4. El volumen obtenido en (3) se reparte de igual manera entre el número de pozos obtenido en (2) obteniéndose el volumen de agua extraído por cada una de las perforaciones.

A todos los pozos de bombeo se les ha ubicado la zona de admisión de agua en el sondeo (filtros, rejillas) dentro de las unidades acuíferas definidas. Esta operación se ha realizado a partir de los valores de profundidad de los pozos suministrados por la JCRMO y combinándolos con la disposición tridimensional de las unidades hidrogeológicas.

3.6.2. Bombeos para abastecimiento urbano e industrial

Para el cálculo de los bombeos de agua subterránea para uso urbano e industrial se ha partido de la información existente en la entidad de carácter público que se encarga de la gestión de los recursos hídricos para abastecimiento en Castilla La Mancha (Aguas de Castilla La Mancha). En concreto se obtuvieron los volúmenes de agua empleados para abastecimiento en las localidades presentes en el SMO para el año 2002. Con la información coleccionada se relacionaron los datos de consumos urbano e industrial con los datos poblacionales obtenidos del Instituto Nacional de Estadística (INE). En este sentido, mediante una regresión lineal entre el número de habitantes y el consumo de agua se obtuvo la relación "habitantes-consumo de agua" para las localidades del entorno de la Mancha Oriental (figura 3.14).



Figura 3.14. Relación entre el número de habitantes y el consumo urbano e industrial en el entorno de la Mancha Oriental para el año 2002 (Fuente: Aguas de Castilla–La Mancha).

A partir de dicho gráfico se puede ver que el consumo urbano e industrial por municipio es de unos 280 l/hab/día (100.54/365/1000). Utilizando dicho valor y asumiendo un consumo constante a través del tiempo, se obtuvieron estimaciones para los años en los que sólo se disponía de datos poblacionales y en aquellas localidades de las que no se pudo obtener ningún registro de consumos para abastecimiento. Para cada municipio se ha dispuesto la localización de los sondeos de abastecimiento y se han relacionado los volúmenes necesarios para el abastecimiento, prestando especial atención a los volúmenes bombeados para la ciudad de Albacete hasta el año 2003, cuando se produce un cambio de toma y esta ciudad comienza a abastecerse con aguas superficiales procedentes del embalse de Alarcón a través del acueducto Tajo Segura (ATS).

4 Calibración del modelo

El propósito general de la calibración es comprobar que el modelo puede reproducir datos registrados en campo. La calibración de un modelo hidrogeológico consiste en encontrar un conjunto de parámetros, las condiciones de contorno y las acciones externas tal que los valores de las variables de salida del mismo concuerdan con un margen de error preestablecido, con los valores registrados en el campo para unas ciertas localizaciones. La calibración puede ser manual o automática.

El proceso de calibración suele comenzar intentando reproducir el comportamiento del sistema modelado en régimen natural. En este trabajo se entiende por régimen natural aquel estado del sistema que correspondería a una situación en la que no existen bombeos, por lo que hablaremos de régimen no influenciado. En un segundo paso, el modelo calibrado en régimen no influenciado, se utilizará en régimen transitorio, entendiéndose por régimen transitorio o influenciado, aquel alterado por la existencia de extracciones de agua subterránea. En esta etapa se "corregirán" aquellos parámetros, condiciones y/o acciones exteriores para garantizar un buen funcionamiento del modelo tanto en régimen influenciado como no influenciado.

En este trabajo, algunas de las condiciones de contorno y las propiedades físicas del lecho del río fueron calibradas en régimen no influenciado y las propiedades físicas de las unidades hidrogeológicas previamente asignadas (ver apartado 3.5), modificadas en el régimen influenciado para reproducir las alturas piezométricas en algunos puntos de medida. Ante cualquier modificación realizada en régimen influenciado, se comprobaba que el modelo seguía funcionando correctamente en régimen no influenciado. En caso contrario se recalibraba el régimen no influenciado y así sucesivamente hasta conseguir una situación apta, dentro de ciertos límites, para ambos regímenes de funcionamiento.

4.1. Calibración en régimen no influenciado

Para la calibración en régimen no influenciado se realizó una simulación del sistema durante el periodo 1940/41-1974/75, esto es, sin bombeos de agua subterránea. Como entrada principal al sistema se utilizaron los valores de recarga por infiltración del agua de precipitación estimados a través del modelo PATRICAL (Pérez-Martín, 2005). En régimen no influenciado se calibraron de forma manual:

- Algunas de las condiciones de contorno.
- Las propiedades físicas del lecho del río Júcar.

4.1.1. Calibración de las condiciones de contorno

Como puede observarse en la figura 4.1, todos los bordes del modelo son impermeables excepto los correspondientes a la zona de Jardín y Lezuza y al límite con la cuenca del Guadiana (Mancha Occidental). A través de estos bordes se producen unas entradas subterráneas. La zona de Jardín-Lezuza fue estudiada durante este proyecto por personal de TRAGSATEC habiéndose determinado un valor orientativo de dichas entradas subterráneas de 35 hm³/año (TRAGSA-TEC, 2010b). En cuanto a la zona que limita con la Mancha Occidental, en base a trabajos previos el valor de las entradas subterráneas se ha fijado en 10 hm³/año (Martínez-Santos et al., 2008).



Figura 4.1. Condiciones de contorno del modelo.

La implementación matemática del contorno con la Mancha Occidental se lleva a cabo utilizando el paquete GHB (*General Head Boundary*) de MODFLOW que permite imponer una condición de flujo prescrito entrando o saliendo al o del modelo desde o hacia el exterior. Como información de entrada fijamos una altura piezométrica razonable representativa del exterior del modelo y calibramos una conductancia en el borde tal que al resolver la ecuación del flujo nos garantice las entradas deseadas. La altura fijada en las cercanías del borde es de 663 m y la conductividad se calibra para asegurar una entrada de 10 hm³/año. Las entradas a través del contorno de Jardín y Lezuza se implementan por medio de una serie de pozos ficticios que inyectan un flujo equivalente a 35 hm³/año.

4.1.2. Calibración de las propiedades físicas del lecho del río Júcar

Las propiedades del lecho del río Júcar a su paso por el ámbito del modelo deberían haber sido calibradas teniendo como objetivo la reproducción de los caudales circulando por el mismo. Ello hubiese requerido disponer de medidas de caudal para distintos tiempos en distintas estaciones de aforo a partir de las cuales poder calcular los caudales diferenciales entre pares de estaciones. Desafortunadamente entre los años 1940/41 y 1974/75 no existen series de caudales aforados con lo cual el objetivo anterior es inalcanzable. En su lugar se planteó obtener unas propiedades del lecho del río que garanticen la reproducción de los caudales medios que circularon durante el año 1975, ya que se dispone de un informe (IGME, 1979) donde se dan dichos valores en algunos tramos de río. Los tramos considerados se pueden ver en la figura 4.2 y son los siguientes:

- Tramo 1: desde el embalse de Alarcón hasta la estación de aforos de El Picazo.
- Tramo 2: desde la estación de aforos de El Picazo hasta la de Los Frailes.
- Tramo 3: desde la estación de aforos de Los Frailes hasta la de Alcalá del Júcar.
- Tramo 4: desde la estación de aforos de Alcalá del Júcar hasta la salida del modelo.



Figura 4.2. Tramos en los que se dividió el río Júcar en el modelo.

El tramo 1 es un tramo muy corto en el cual el río pierde un caudal medio anual no superior a 1 $\text{hm}^3/\text{año} (0.03 \text{ m}^3/\text{s})$. En el segundo tramo los aforos diferenciales de 1975 indican que el río gana entre 6 y 6.5 m^3/s , es decir, 190 a 200 $\text{hm}^3/\text{año}$. El tercer tramo muestra que el río gana

a razón de unos 2 m^3/s , esto es, unos 65 $hm^3/año$. En el último tramo los aforos diferenciales indican que el río Júcar gana un caudal de entre 0.5 a 1 m^3 /s. En las figuras 4.3 a 4.6 se pueden observar los caudales circulando por el río en cada tramo para el modelo calibrado en régimen no influenciado.



Figura 4.3. Caudales en el tramo 1 del río (desde el embalse de Alarcón hasta la estación de aforos de El Picazo).



Figura 4.4. Caudales en el tramo 2 del río (desde la estación de aforos de El Picazo hasta la de Los Frailes).



Figura 4.5. Caudales en el tramo 3 del río (desde la estación de aforos de Los Frailes hasta la de Alcalá del Júcar).



Figura 4.6. Caudales en el tramo 4 del río (desde la estación de aforos de Alcalá del Júcar hasta la salida del modelo).

4.2. Calibración en régimen influenciado

En este trabajo se llama régimen influenciado a aquel estado de funcionamiento del sistema en que actúan los bombeos de agua subterránea. Se considera que la explotación intensiva del SMO comienza en el año 1975 y por ello para la calibración del régimen influenciado se simuló el

periodo 1975/76-2009/10. Los parámetros a calibrar fueron la conductividad hidráulica de cada unidad hidrogeológica, sus propiedades de almacenamiento y la conductancia del lecho del río. Los criterios para realizar la calibración fueron conseguir reproducir los caudales diferenciales en los distintos tramos del río Júcar y las tendencias de las alturas piezométricas.

Al igual que en el régimen no influenciado, la entrada principal al sistema es la recarga por infiltración del agua de precipitación estimada a través del modelo PATRICAL (Pérez-Martín, 2005). La calibración se hizo de forma manual y en el siguiente orden:

- Las condiciones de contorno.
- Las propiedades físicas del lecho del río Júcar.
- Las propiedades físicas de las unidades hidrogeológicas.

4.2.1. Calibración de las condiciones de contorno

Las condiciones de contorno utilizadas en régimen influenciado son las calibradas en régimen no influenciado con excepción del borde correspondiente a las entradas subterráneas desde la Mancha Occidental. En régimen no influenciado se calibró una conductancia que garantiza unas entradas medias anuales de aproximadamente 10 $\text{hm}^3/\text{año}$ dada una altura piezométrica en el contorno igual a 663 m. La razón por la que se consideró una altura fija fue por que no se disponía de medidas de piezometría antes de 1975. A partir de ese año se dispone de una serie de medidas de altura piezométrica en un piezómetro cuya ubicación puede verse en la figura 4.7. La serie de alturas piezométricas para este piezómetro se ha representado gráficamente en la figura 4.8.



Figura 4.7. Condición de contorno en el límite con la Mancha Occidental y localización del piezómetro utilizado para su calibración en régimen influenciado.

Por tanto, la calibración de ese contorno en régimen influenciado se realizó manteniendo fija la conductancia del contorno calibrada en régimen no influenciado pero permitiendo que la altura varíe según la serie registrada. Luego el flujo medio anual no será exactamente 10 $\text{hm}^3/\text{año}$ pero oscilará alrededor de este valor según va cambiando la altura piezométrica.



Figura 4.8. Serie de alturas piezométricas del piezómetro utilizado para calibrar el contorno en el límite con la Mancha Occidental en régimen influenciado.)

4.2.2. Calibración de las propiedades físicas del lecho del río Júcar

Los valores asignados a la conductividad del lecho del río Júcar durante la calibración en régimen no influenciado fueron modificados hasta conseguir una buena reproducción de las series de aforos diferenciales registrados en los distintos tramos del río. Recordar que en el caso de régimen no influenciado no se disponía de registros similares y por ello la calibración se hizo con el fin de reproducir valores medios durante la serie. En las figuras 4.9 a 4.12 se pueden observar las series de caudales diferenciales en los 4 tramos del río y los valores simulados por el modelo. En los tramos 1 y 4 no se dispone de aforos.



Figura 4.9. Caudales diferenciales simulados en el tramo 1 del río (desde el embalse de Alarcón hasta la estación de aforos de El Picazo) en régimen influenciado.

.



Figura 4.10. Caudales diferenciales aforados y simulados en el tramo 2 del río (desde la estación de aforos de El Picazo hasta la de Los Frailes) en régimen influenciado.



Figura 4.11. Caudales diferenciales aforados y simulados en el tramo 3 del río (desde la estación de aforos de Los Frailes hasta la de Alcalá del Júcar) en régimen influenciado.

Los valores máximos y mínimos no se reproducen en el modelo, ya que éstos dependen de fenómenos hidrológicos de corta duración y también pueden estar afectados por el manejo del agua embalsada. Estos fenómenos no pueden ser reproducidos en un modelo de simulación de flujo de agua subterránea sin modelos hidrológicos acoplados.



Figura 4.12. Caudales diferenciales simulados en el tramo 4 del río (desde la estación de aforos de Alcalá del Júcar hasta la salida del modelo) en régimen influenciado.

4.2.3. Calibración de las propiedades físicas de las unidades hidrogeológicas

Los valores de las propiedades físicas asignados en la calibración en régimen no influenciado a las unidades hidrogeológicas, fueron corregidos para conseguir la reproducción de los niveles piezométricos observados en algunos localizaciones. Para ello se seleccionaron 46 piezómetros teniendo en cuenta su localización y la longitud de la serie histórica disponible. En la figura 4.13 se representan las localizaciones de dichos piezómetros cuyos ajustes se muestran más abajo. Se han seleccionado 4 piezómetros por cada uno de los principales dominios hidrogeológicos, 4 cercanos al río y 3 de medida continua. En las figuras 4.14 a 4.19 se pueden ver los ajustes realizados. La serie representada corresponde a los años hidrológicos 1980/81 a 2009/10¹. Aunque en algunos casos la serie de medidas no está completa, puede verse que los ajustes son bastante buenos. En el caso de los piezómetros cercanos al río la reproducción de niveles es excelente.

¹En adelante los resultados para el régimen influenciado se representarán gráficamente a partir del año hidrológico 1980/81 tal como lo ha solicitado CHJ.



Figura 4.13. Localización de los piezométricos cuyos ajustes se muestran en las figuras siguientes.



Figura 4.14. Evolución de los niveles piezométricos en 4 piezómetros del Dominio Central.



Figura 4.15. Evolución de los niveles piezométricos en 4 piezómetros del Dominio Moro-Nevazos.



Figura 4.16. Evolución de los niveles piezométricos en 4 piezómetros del Dominio Septentrional.



Figura 4.17. Evolución de los niveles piezométricos en 4 piezómetros del Dominio Salobral-Los Llanos.



Figura 4.18. Evolución de los niveles piezométricos en 4 piezómetros cercanos al río.



Figura 4.19. Evolución de los niveles piezométricos en 3 piezómetros de medida continua.

5 Análisis de los resultados del modelo calibrado

Este capítulo presenta un análisis detallado de los resultados obtenidos a partir del modelo calibrado en el capítulo 4 tanto en régimen "natural" o no influenciado como en régimen "alterado" o influenciado por los bombeos. A pedido de la OPH de la CHJ los periodos para el análisis y presentación de resultados son los comprendidos entre los años hidrológicos 1940/41 y 1979/80 para el régimen no influenciado y entre 1980/81 y 2009/10 para el régimen influenciado. También se realizó una simulación extendiendo el régimen no influenciado hasta el año 2009/10 y se realizan balances individualizados para los dos últimos años hidrológicos, 2008/09 y 2009/10. Por lo tanto se presentan resultados para los siguientes periodos:

- Régimen no influenciado:
 - 1940/41 y 1979/80.
 - 1980/81 y 2009/10.
 - -2008/09.
 - -2009/10.
- Régimen Influenciado:
 - 1980/81 y 2009/10.
 - -2008/09.
 - -2009/10.

El análisis se basa en un balance de masa para cada año hidrológico, lo que nos permite evaluar la relación entre el río y el acuífero, la condición de funcionamiento del primero y la evolución del almacenamiento en el segundo. Las entradas, las salidas y las variables de control, así como la forma en que se calculan, se detallan para cada régimen de funcionamiento.

5.1. Régimen no influenciado

El régimen no influenciado por los bombeos fue estudiado a lo largo de todo el periodo de simulación, es decir, desde 1940/41 a 2009/10. En la realidad, las fuertes extracciones comenzaron

a partir de los 80. La razón por la cual se simuló el régimen no influenciado hasta el año 2009/10, fue intentar acercarse a una posible situación del acuífero sin explotación alguna. Esto se consiguió desactivando los bombeos en el modelo influenciado.

5.1.1. Entradas, salidas y variables de control

Considerando los acuíferos del SMO como el sistema a modelar, las entradas a tener en cuenta son:

- La infiltración a través del lecho del río Júcar. Sus valores son obtenidos realizando un balance de masa con MODFLOW.
- La infiltración a través de los lechos de los ríos Jardín y Lezuza. Se ha estimado (TRAG-SATEC, 2010b) un valor medio igual a 37.32 hm³/año entre 1940/41 y 2009/10 (6.67 en Tiriez + 30.65 en Balazote). Este valor servirá como un valor orientativo a la hora de la implementación de la entrada.
- La infiltración de agua de lluvia. Valores calibrados por la OPH de la CHJ utilizando el modelo PATRICAL (Pérez-Martín, 2005).
- Las entradas subterráneas desde la Mancha Occidental. Se estima un valor de 10 hm³/año a partir de informes, piezometría y calibración (Martínez-Santos et al., 2008).
- Las entradas subterráneas por la zona de Jardín y Lezuza. Se estima (TRAGSATEC, 2010b) un valor medio igual a 33.92 hm³/año entre 1940/41 y 2009/10.

Por su parte las salidas son:

 El drenaje hacia el río Júcar. Sus valores son obtenidos realizando un balance de masa con MODFLOW.

Las transferencias de masa de agua en un sentido y otro entre río y acuífero se calculan utilizando la herramienta ZONEBUDGET (Harbough, 1990) de MODFLOW.

5.1.2. Balance de masa

La información del balance de masa en cada caso se presenta en forma de tabla considerando las entradas y las salidas por separado. Se calcula el cambio en el almacenamiento para cada año hidrológico, esto es, de cada 1 de octubre a cada 30 de septiembre. Recordar que el modelo realiza simulaciones a escala mensual. Cada registro anual se calculó como suma de los 12 mensuales. Así, los valores que aparecen en las tablas de más abajo son valores medios anuales dentro de cada serie. Luego, la información en dichas tablas debe interpretarse como un comportamiento medio anual del sistema a lo largo del periodo analizado.

El resultado de los balances para los periodos 1940/41-1979/80 y 1980/81-2009/10 se pueden ver en las tablas 5.1 y 5.2, respectivamente. Con el fin de estudiar con más detalle los dos últimos años se han calculado por separado los balances para los años hidrológicos 2008/09 y 2009/10 que se muestran en las tablas 5.3 y 5.4.

A partir del cálculo de los balances medios anuales es posible estudiar como evoluciona el almacenamiento del acuífero dentro del periodo de análisis. En las figuras 5.1 y 5.2 se puede ver el comportamiento del almacenamiento para los periodos 1940/41-1979/80 y 1980/81-2009/10 en régimen no influenciado, respectivamente.

Las barras representan el cambio en el volumen de agua almacenado en el acuífero calculado como la diferencia entre lo que entra y lo que sale cada año hidrológico. Por tanto, una barra en sentido positivo significa que las entradas superan a las salidas y el acuífero se ha recargado

Balance de la masa de	agua pa	ra 1940/41-197	9/80 (hm	³ /año)
Entradas		Salidas		Cambios
Infiltración Júcar	7.08	Drenaje Júcar	235.94	$\Delta S_{ m río} = {f 228.86}$
Infiltración Lezuza, Jardín	45.11			
Infiltración Lluvia	186.84			
Entradas subt. Mancha Occidental	4.16			
Entradas subt. Jardín-Lezuza	34.00			
Total	277.19		235.94	$\Delta S_{acu} = 41.25$

Tabla 5.1. Balance de la masa de agua para el periodo 1940/41-1979/80 en régimen no influenciado.

Balance de la masa de	agua pa	ra 1980/81-200	9/10 (hm	³ /año)
Entradas		Salidas		Cambios
Infiltración Júcar	7.88	Drenaje Júcar	217.13	$\Delta S_{ m río} = {f 209.25}$
Infiltración Lezuza, Jardín	26.87			
Infiltración Lluvia	152.07			
Entradas subt. Mancha Occidental	9.74			
Entradas subt. Jardín-Lezuza	34.00			
Total	230.56		217.13	$\Delta S_{acu} = 13.43$

Tabla 5.2. Balance de la masa de agua para el periodo 1980/81-2009/10 en régimen no influenciado.

Balance de la mas	sa de agu	a para 2008/09	$\theta \ (hm^3/an)$	0)
Entradas		Salidas		Cambios
Infiltración Júcar	7.87	Drenaje Júcar	216.83	$\Delta S_{ m río} = {f 208.96}$
Infiltración Lezuza, Jardín	41.34			
Infiltración Lluvia	284.52			
Entradas subt. Mancha Occidental	11.49			
Entradas subt. Jardín-Lezuza	34.00			
Total	379.22		216.83	$\Delta S_{acu} = 159.39$

Tabla 5.3. Balance de la masa de agua para el periodo 2008/09 en régimen no influenciado.

Balance de la mas	a de agu	a para 2009/10	(hm^3/an)	o)
Entradas		Salidas		Cambios
Infiltración Júcar	6.12	Drenaje Júcar	254.44	$\Delta S_{ m río} = {f 248.32}$
Infiltración Lezuza, Jardín	125.79			
Infiltración Lluvia	564.00			
Entradas subt. Mancha Occidental	7.44			
Entradas subt. Jardín-Lezuza	34.00			
Total	737.35		254.44	$\Delta S_{acu} = \!\! 482.91$

Tabla 5.4. Balance de la masa de agua para el periodo 2009/10 en régimen no influenciado.

durante ese año. Por el contrario, una barra en sentido negativo indica que el acuífero ha perdido parte del volumen almacenado.

Si se acumulan los cambios anuales en el almacenamiento se obtiene la línea azul continua de las figuras 5.1 y 5.2. En general, si la representación gráfica de los cambios de almacenamiento acumulados sigue una tendencia descendente, el acuífero se está vaciando. Si la tendencia es creciente se está llenando. El valor final indica el volumen de agua que el acuífero ha ganado o perdido durante el periodo de análisis con respecto a la situación inicial. Para el periodo 1940/41 a 1979/80 si se multiplica el valor de las pérdidas medias anuales según el balance de la tabla $5.1 (41.25 \text{ hm}^3)$, por los 40 años de la serie se obtienen los 1650 hm³ que indica el gráfico de la figura 5.1 como volumen perdido por el acuífero hasta el año 1979/80 (exactamente 1686 hm³). Para el periodo 1980/81 a 2009/10 si se multiplica el valor de las pérdidas medias anuales según el balance de la tabla $5.2 (13.43 \text{ hm}^3)$, por los 30 años de la serie se obtienen los 403 hm³ que indica el gráfico de la figura $5.2 \text{ como volumen perdido por el acuífero hasta el año 2009/10 (exactamente 421 hm³).$



Figura 5.1. Evolución del almacenamiento del acuífero para el periodo 1940/41-1979/80 en régimen no influenciado.



Figura 5.2. Evolución del almacenamiento del acuífero para el periodo 1980/81-2009/10 en régimen no influenciado.

En las figuras 5.3 y 5.4 se representa gráficamente la evolución temporal de cada componente de los balances realizados. Ellas son el almacenamiento, la recarga, las entradas subterráneas desde la Mancha Occidental y por la zona de los ríos Jardín y Lezuza, la infiltración desde el río

al acuífero y el drenaje del acuífero al río. Como puede observarse las últimos tres componentes tienen un comportamiento casi constante por lo que la evolución del almacenamiento está totalmente controlada por la recarga. Por tanto, puede pensarse al acuífero como un gran tanque cuyas entradas son todas aproximadamente constantes excepto la recarga por agua de precipitación que varía en el tiempo. Luego, las salidas del acuífero (agua que drena al río) estarán directamente influenciadas por dicha recarga. Las figuras 5.3 y 5.4 así lo demuestran.



Figura 5.3. Evolución de las componentes del balance hídrico para el periodo 1940/41-1979/80 en régimen no influenciado.



Figura 5.4. Evolución de las componentes del balance hídrico para el periodo 1980/81-2009/10 en régimen no influenciado.

5.1.3. Relación entre el río y el acuífero

Una forma de analizar con cierto detalle la relación entre el río y el acuífero consiste en discriminar los flujos entre éstos según los tramos establecidos en el apartado 4.1.2. Las tablas 5.5 a 5.8 muestran los balances río-acuífero para los periodos 1940/41-1979/80, 1980/81-2009/10, 2008/09 y 2009/10. Se han calculado los flujos que van del acuífero al río y del río al acuífero para cada tramo, y se han evaluado los balances en cada uno de ellos para establecer la condición del río (ganador o perdedor). Se observa que para todos los periodos analizados el río es perdedor entre Alarcón y Picazo y ganador desde Picazo a la salida del sistema.

Relación río-acuífe	ro para 1940/-	41-1979/80 (en	$hm^3/ano)$	
Tramo	Acuífero a río	Río a acuífero	Neto $(E-S)$	Condición
Alarcón-Picazo	0.01	0.96	-0.95	Perdedor
Picazo-Los Frailes	169.44	3.85	165.59	Ganador
Los Frailes-Alcalá del Júcar	52.72	2.40	50.32	Ganador
Alcalá del Júcar-Salida del sistema	13.76		13.76	Ganador
Total	235.93	7.21	$\Delta S_{\rm río} =$	228.72

Tabla 5.5. Relación entre el río y el acuífero para el periodo 1940/41-1979/80 en régimen no influenciado.

Relación río-acuífe	ro para 1980/8	81-2009/10 (en	$hm^3/año)$	
Tramo	Acuífero a río	Río a acuífero	Neto $(E-S)$	Condición
Alarcón-Picazo	0.00	0.93	-0.93	Perdedor
Picazo-Los Frailes	150.73	4.56	146.17	Ganador
Los Frailes-Alcalá del Júcar	52.63	2.40	50.23	Ganador
Alcalá del Júcar-Salida del sistema	13.77		13.77	Ganador
Total	217.13	7.89	$\Delta S_{ m río} =$	209.24

Tabla 5.6. Relación entre el río y el acuífero para el periodo 1980/81-2009/10 en régimen no influenciado.

Relación río-a	cuífero para 20	$008/09 \ (en \ hm^3)$	/año)	
Tramo	Acuífero a río	Río a acuífero	Neto $(E-S)$	Condición
Alarcón-Picazo	0.01	0.91	-0.90	Perdedor
Picazo-Los Frailes	148.06	4.75	143.31	Ganador
Los Frailes-Alcalá del Júcar	54.66	2.21	52.45	Ganador
Alcalá del Júcar-Salida del sistema	14.09		14.09	Ganador
Total	216.82	7.87	$\Delta S_{ m río} =$	208.95

Tabla 5.7. Relación entre el río y el acuífero para el periodo 2008/09 en régimen no influenciado.

Relación río-a	cuífero para 20	$009/10 \ (en \ hm^3)$	/año)	
Tramo	Acuífero a río	Río a acuífero	Neto $(E-S)$	Condición
Alarcón-Picazo	0.06	0.92	-0.86	Perdedor
Picazo-Los Frailes	177.50	3.61	173.89	Ganador
Los Frailes-Alcalá del Júcar	62.29	1.60	60.69	Ganador
Alcalá del Júcar-Salida del sistema	14.59		14.59	Ganador
Total	254.44	6.13	$\Delta S_{ m río} =$	248.31

Tabla 5.8. Relación entre el río y el acuífero para el periodo 2009/10 en régimen no influenciado.

5.2. Régimen influenciado

Siguiendo los mismos criterios que para régimen no influenciado, fue analizado el régimen influenciado. La serie abarca desde el año hidrológico 1980/81 hasta el 2009/10. También se analizan individualmente los años 2008/09 y 2009/10. En régimen influenciado se deben agregar a las entradas la infiltración a través del lecho del Canal de María Cristina, los retornos de riego tanto por agua subterránea como superficial y por supuesto, como salidas los bombeos.

5.2.1. Entradas, salidas y variables de control

Considerando los acuíferos del SMO como el sistema a modelar, las entradas a tener en cuenta son:

- La infiltración a través del lecho del río Júcar. Sus valores son obtenidos realizando un balance de masa con MODFLOW.
- La infiltración a través de los lechos de los ríos Jardín y Lezuza y el Canal de María Cristina. Se utiliza la serie de aforos entre los años 1980/81 y 2009/10 (valor medio igual a 17.69 hm³/año) para los ríos Jardín y Lezuza y se estima un valor medio de 14.4 hm³/año para el Canal. Esto hace un total de 32.09 hm³/año. Este valor servirá como un valor orientativo a la hora de la implementación de la entrada.
- La infiltración de agua de lluvia. Valores calibrados por la OPH de la CHJ utilizando el modelo PATRICAL (Pérez-Martín, 2005).
- Los retornos de riego. Se fija un porcentaje de 10% de las dotaciones brutas (TRAGSA-TEC, 2010a) y se consideran también los retornos por agua superficial evaluados por CHJ en 10 hm³/año.
- Las entradas subterráneas desde la Mancha Occidental. Se utiliza la serie piezométrica disponible en un pozo cerca del límite lo que permite obtener un flujo medio de $3.2 \text{ hm}^3/\text{año}$ para la serie.
- Las entradas subterráneas por la zona de Jardín y Lezuza. Se estima (TRAGSATEC, 2010b) un valor medio igual a 33.95 hm³/año entre 1980/81 y 2009/10.

Por su parte las salidas son:

- El drenaje hacia el río Júcar. Sus valores son obtenidos realizando un balance de masa con MODFLOW.
- Los bombeos. Las extracciones son calculadas a partir de las superficies ERMOT y las dotaciones de la JCRMO.

Las transferencias de masa de agua en un sentido y otro entre río y acuífero se calculan utilizando la herramienta ZONEBUDGET (Harbough, 1990) de MODFLOW.

5.2.2. Balance de masa

En la tabla 5.9, puede verse el balance de masas para el periodo 1980/81 a 2009/10. Se aprecia que el acuífero pierde durante ese periodo un volumen medio anual de aproximadamente 122 hm^3 . Los balances para los años hidrológicos 2008/09 y 2009/10 se presentan en las tablas 5.10 y 5.11.

En la figura 5.5 se pueden ver la evolución del almacenamiento a lo largo de la serie analizada. Se aprecia una clara tendencia al vaciado del acuífero hasta que en los años 2006/07 y 2007/08 se insinúa una estabilización del almacenamiento que se confirma con la recuperación sufrida

Balance de la masa de	agua par	a 1980/81-2009)/10 (en l	m^3/a no)
Entradas		Salidas		Cambios
Infiltración Júcar	34.02	Drenaje Júcar	104.67	$\Delta S_{ m río} = {f 70.65}$
Infiltración Lezuza, Jardín, MC.	32.04	Bombeos	307.27	
Infiltración Lluvia	152.54			
Retornos de riego subterráneo	29.08			
Retornos de riego superficial	7.83			
Entradas subt. Mancha Occidental	2.36			
Entradas subt. Jardín-Lezuza	32.61			
Total	290.49		411.94	$\Delta S_{acu} = \textbf{-121.45}$

Tabla 5.9. Balance de la masa de agua para el periodo 1980/81-2009/10 en régimen influenciado.

Balance de la masa	de agua	para 2008/09 ($en hm^3/a$	ño)
Entradas		Salidas		Cambios
Infiltración Júcar	38.58	Drenaje Júcar	94.62	$\Delta S_{ m río} = {f 56.04}$
Infiltración Lezuza, Jardín, MC.	36.23	Bombeos	284.87	
Infiltración Lluvia	282.41			
Retornos de riego subterráneo	28.21			
Retornos de riego superficial	8.76			
Entradas subt. Mancha Occidental	-0.48			
Entradas subt. Jardín-Lezuza	32.55			
Total	426.25		379.49	$\Delta S_{acu} = 46.76$

Tabla 5.10. Balance de la masa de agua para el periodo 1980/81-2009/10 en régimen influenciado.

Balance de la masa	de agua	para 2009/10	$(\text{en hm}^3/\text{a})$	uño)
Entradas		Salidas		Cambios
Infiltración Júcar	30.34	Drenaje Júcar	109.39	$\Delta S_{ m río} = {f 79.05}$
Infiltración Lezuza, Jardín, MC.	125.78	Bombeos	235.80	
Infiltración Lluvia	558.81			
Retornos de riego subterráneo	23.42			
Retornos de riego superficial	8.43			
Entradas subt. Mancha Occidental	2.34			
Entradas subt. Jardín-Lezuza	32.55			
Total	781.67		345.18	$\Delta S_{acu} = 436.49$

Tabla 5.11. Balance de la masa de agua para el periodo 1980/81-2009/10 en régimen influenciado.

durante los años hidrológicos 2008/09 y 2009/10 donde la recarga por precipitación es alta. Multiplicando el valor de las pérdidas medias anuales según el balance de la tabla 5.9 (122 hm³), por los 30 años de la serie se obtienen los casi 3700 hm³ que indica el gráfico de la figura 5.5 como volumen perdido por el acuífero hasta el año 2009/10.

Por su parte la figura 5.6 muestra la evolución temporal de las componentes del balance por separado. En régimen influenciado aparece una componente más: los bombeos. Puede verse que la cantidad de agua extraída del acuífero ha ido creciendo desde los 80 hasta los últimos años en los que a través de las OPAD y las sustituciones se ha conseguido que bajen algo. La evolución del almacenamiento está claramente controlada por la recarga y los bombeos mostrando una tendencia a la recuperación en los últimos dos años hidrológicos, años en los que la recarga ha sido importante.



Figura 5.5. Evolución del almacenamiento del acuífero para el periodo 1980/81-2009/10 en régimen influenciado.



Figura 5.6. Evolución de las componentes del balance hídrico para el periodo 1980/81-2009/10 en régimen influenciado.

5.2.3. Relación entre el río y el acuífero

Al igual que hicimos en el caso de régimen no influenciado, en este apartado se analiza la relación entre el río y el acuífero discriminando los flujos entre éstos según los tramos de río establecidos en el apartado 4.1.2. Las tablas 5.12 a 5.14 muestran los balances río-acuífero para los periodos 1980/81-2009/10, 2008/09 y 2009/10. Se han calculado los flujos que van del acuífero al río y del río al acuífero para cada tramo, y se han evaluado los balances en cada uno de ellos para establecer la condición del río (ganador o perdedor). Se observa que para todos los periodos analizados el río es perdedor entre Alarcón y Picazo y ganador desde Picazo a la salida del sistema, excepto para el año 2008/09 en que el río es perdedor en los dos primeros tramos y ganador hasta la salida del sistema.

Relación río-acuífero para 1980/81-2009/10 (en $hm^3/año$)							
Tramo	Acuífero a río	Río a acuífero	Neto $(E-S)$	Condición			
Alarcón-Picazo	0.00	1.14	-1.14	Perdedor			
Picazo-Los Frailes	42.94	29.51	13.43	Ganador			
Los Frailes-Alcalá del Júcar	48.13	3.37	44.75	Ganador			
Alcalá del Júcar-Salida del sistema	13.60	0.00	13.60	Ganador			
Total	104.67	34.02	$\Delta S_{ m río} =$	70.65			

Tabla 5.12. Relación entre el río y el acuífero para el periodo 1980/81-2009/10 en régimen influenciado.

Relación río-acuífero para 2008/09 (en $hm^3/año$)							
Tramo	Acuífero a río	Río a acuífero	Neto $(E-S)$	Condición			
Alarcón-Picazo	0.00	0.93	-0.93	Perdedor			
Picazo-Los Frailes	31.90	34.45	-2.55	Perdedor			
Los Frailes-Alcalá del Júcar	48.96	3.20	45.76	Ganador			
Alcalá del Júcar-Salida del sistema	13.76	0.00	13.76	Ganador			
Total	94.62	38.58	$\Delta S_{ m río} =$	56.04			

Tabla 5.13. Relación entre el río y el acuífero para el periodo 2008/09 en régimen influenciado.

Relación río-acuífero para $2009/10$ (en hm ³ /año)							
Tramo	Acuífero a río	Río a acuífero	Neto $(E-S)$	Condición			
Alarcón-Picazo	0.04	0.92	-0.88	Perdedor			
Picazo-Los Frailes	38.87	26.99	11.88	Ganador			
Los Frailes-Alcalá del Júcar	56.22	2.43	53.79	Ganador			
Alcalá del Júcar-Salida del sistema	14.26	0.00	14.26	Ganador			
Total	109.39	30.34	$\Delta S_{ m río} =$	79.05			

Tabla 5.14. Relación entre el río y el acuífero para el periodo 2009/10 en régimen influenciado.

Para estudiar como los bombeos afectaron las relaciones río-acuífero se representaron gráficamente los caudales diferenciales circulando por el río entre las estaciones de aforo de El Picazo y Alcalá del Júcar durante el periodo que va desde 1984 a 2005 (ver figura 5.7). Se observa como



Figura 5.7. Caudales diferenciales anuales entre las estaciones de aforo de El Picazo y Alcalá del Júcar durante el periodo 1984-2005.

el río ha pasado de ser ganador, con unos aportes de 150 $\text{hm}^3/\text{año}$, a mediados de los años 80, a estar en equilibrio (ganador-perdedor) en el año 2000, y a ceder agua al acuífero (perdedor) con una media de 70 $\text{hm}^3/\text{año}$ desde 2001 hasta 2008. Este hecho, junto con la sustitución de bombeos, ha provocado el suavizado de la variación de almacenamiento entre el año 2000 y el 2005. Lo cual queda patente si se observa la relación lineal que existe entre las extracciones de aguas subterráneas y la detracción de los caudales del río Júcar (ver figura 5.8 superior), así como, los caudales detraídos y la variación de almacenamiento (ver figura 5.8 inferior). Esto es lógico y se debe a que al comienzo de un bombeo continuado, toda el agua bombeada procede del

almacenamiento. Posteriormente comienza a influir en el caudal del río, disminuyendo el efecto sobre el almacenamiento. Si continúa el bombeo, todo el caudal procede del río y la variación del almacenamiento se anula.



Figura 5.8. Relación entre las extracciones de aguas subterráneas y la detracción de los caudales del río (arriba) y entre los caudales detraídos y la variación de almacenamiento (abajo).



Figura 5.9. Relación entre los niveles piezométricos y el lecho del río para los años 1985, 1995 y 2005.

Un aspecto interesante de las relaciones río acuífero en un clima semiárido con fuerte explotación de los recursos subterráneos, es la determinación espacio temporal de la posición del punto de desconexión entre el río y el acuífero. Utilizando el modelo calibrado se obtuvieron los niveles piezométricos para tres años (1985, 1995 y 2005) a lo largo de la traza del río en un tramo comprendido entre las estaciones de aforo de El Carrasco y Los Frailes, y se las comparo con la cota del lecho del mismo. El resultado puede verse en la figura 5.9.

Antes del comienzo de las extracciones de agua subterránea para el abastecimiento de los cultivos de regadío (principios de los 80) puede observarse que los niveles piezométricos se encuentran por encima del lecho del río en todo el tramo considerado. Por tanto el río tenía en este tramo un comportamiento de río ganador. Pasados quince años de explotación intensiva de las aguas subterráneas (hasta 1995) el punto de desconexión río-acuífero en este tramo se localiza a unos 20 km de la estación de aforos de El Carrasco, en las proximidades del paraje de Cuasiermas. Parece observarse que este punto no se desplaza a partir del año 1995 hasta 2005. Las razones de este estancamiento de la desconexión parecen ser geológicas y requieren de un profundo estudio de la zona de Cuasiermas.
6 Predicciones

Una de las utilidades más atractivas de los modelos de simulación es aplicarlos para predecir el futuro. Las predicciones cuantifican las respuestas del sistema modelado a futuros eventos denominados escenarios. En una simulación predictiva, los parámetros del modelo determinados durante la calibración y la verificación son utilizados para predecir el futuro. Para ello, en el modelo calibrado se modifican aquellos parámetros y/o acciones externas que van a cambiar, o que se cree que podrían cambiar y cuyo efecto se desea evaluar. Por tanto, la predicción requiere estimar cómo esos parámetros y acciones se van a comportar en el futuro. Esta información solo puede conocerse con incertidumbre, luego las predicciones obtenidas también serán inciertas. En este capítulo, y a sugerencia de la OPH de la CHJ, se plantean una serie de escenarios y se utiliza el modelo para estudiar la respuesta del sistema.

6.1. Definición de escenarios

Los escenarios planteados hasta ahora son bastante sencillos y corresponden a cinco configuraciones de bombeo que se extienden hasta el año hidrológico 2026-2027, año hasta el que se plantearon las actuaciones sobre el sistema en el Plan Hidrológico del Júcar. Ellos son:

- Escenario 1: en el cual los bombeos son de 350 hm³/año.
- Escenario 2: en el cual los bombeos son de 300 hm³/año.
- Escenario 3: en el cual los bombeos son de 280 hm³/año.
- Escenario 4: en el cual los bombeos son de 250 hm³/año.
- Escenario 5: en el cual los bombeos son de 220 hm³/año.

Los bombeos anteriores se derivan de 5 situaciones propuestas por la JCRMO de uso del suelo a partir de 2008/09. Los regantes sugirieron una serie de cultivos, unas áreas cultivadas, y unas dotaciones, todo lo cual es procesado para estimar unos volúmenes de agua que se asignan a los pozos implementados en el modelo.

Todas las entradas al sistema hasta el año 2009/10 corresponden a las presentadas en el apartado 5.2.1, esto es, a las del modelo calibrado. A partir del año 2010/11 es necesario asumir una cierta distribución temporal de las acciones externas. Las entradas al SMO se definen de la siguiente manera:

- La infiltración a través del lecho del río Júcar. Sus valores son obtenidos realizando un balance de masa con MODFLOW.
- La infiltración a través de los lechos de los ríos Jardín y Lezuza y el Canal de María Cristina. Se utiliza el valor medio de la serie entre los años 1980/81 y 2009/10 (32.09 hm³/año).
- La infiltración de agua de lluvia. Se utiliza el valor medio calibrados por la OPH de la CHJ utilizando el modelo PATRICAL (Pérez-Martín, 2005), de la serie entre los años 1980/81 y 2009/10 (152.54 hm³/año).
- Los retornos de riego. Se fija un porcentaje de 10% de las dotaciones brutas (TRAGSA-TEC, 2010a) y se consideran también los retornos por agua superficial evaluados por CHJ en $10 \text{ hm}^3/\text{año}$.
- Las entradas subterráneas desde la Mancha Occidental. Se extrapola la tendencia de la serie piezométrica disponible en un pozo cerca del límite correspondiente.
- Las entradas subterráneas por la zona de Jardín y Lezuza. Se utiliza el valor medio de la serie 1980/81 y 2009/10 (33.95 hm³/año).

Por su parte las salidas son:

- El drenaje hacia el río Júcar. Sus valores son obtenidos realizando un balance de masa con MODFLOW.
- Los bombeos son los correspondientes a cada escenario.

Con todo, las transferencias de masa de agua en un sentido y otro entre río y acuífero se calculan utilizando la herramienta ZONEBUDGET (Harbough, 1990) de MODFLOW.

6.2. Resultados de la predicción

Como en el capítulo 5, la información del balance de masa en cada escenario se presenta en forma de tabla considerando las entradas y las salidas por separado. Se calcula el cambio en el almacenamiento para cada año hidrológico (entradas - salidas), y se discrimina el comportamiento del río según cada tramo establecido en el apartado 4.1.2. En este caso además, se representa gráficamente la evolución de los caudales en los tramos 2 y 3 del río, que es donde se dispone de serie histórica. Por último, se estudia la evolución de algunos piezómetros de las alturas piezométricas.

6.2.1. Balance de masa

Las tablas 6.1 a 6.5 muestran el resultado del balance medio anual durante la serie 1980/81 a 2026/27 para los cinco escenarios descritos más arriba. Se presentan los escenarios ordenados desde el de mayor tasa de bombeo al de menor tasa de extracciones. En el capítulo 5, se mostró como los últimos años el almacenamiento del acuífero parecía estabilizarse y comenzar a crecer gracias a las políticas implementadas por regantes y gestores y a las fuertes precipitaciones. Los escenarios planteados suponen unas extracciones que no pueden ser compensadas por las entradas por lo que el agua almacenada en el acuífero decae año tras año. El volumen medio de agua perdido será proporcional a los bombeos como se observa en el valor final de las tablas.

Balance de la masa de agua para la serie $2010/11-2026/27$ (en hm ³ /año)						
Entradas		Salidas		Cambios		
Infiltración Júcar	48.93	Drenaje Júcar	85.95	$\Delta S_{ m río} = {f 37.01}$		
Infiltración Lezuza, Jardín, MC.	32.05	Bombeos	339.16			
Infiltración Lluvia	152.80					
Retornos de riego subterráneo	34.85					
Retornos de riego superficial	8.64					
Entradas subt. Mancha Occidental	0.30					
Entradas subt. Jardín-Lezuza	31.62					
Total	309.19		425.11	$\Delta S_{acu} = \textbf{-115.92}$		

Tabla 6.1. Balance de la masa para el periodo 1980/81 a 2027/28 para el escenario 1.

Balance de la masa de agua para la serie $2010/11-2026/27$ (en hm ³ /año)						
Entradas		Salidas	Cambios			
Infiltración Júcar	37.47	Drenaje Júcar	93.59	$\Delta S_{ m río} = {f 56.13}$		
Infiltración Lezuza, Jardín, MC.	32.05	Bombeos	292.21			
Infiltración Lluvia	153.01					
Retornos de riego subterráneo	30.01					
Retornos de riego superficial	8.64					
Entradas subt. Mancha Occidental	-1.99					
Entradas subt. Jardín-Lezuza	31.99					
Total	291.18		385.81	$\Delta S_{acu} = \textbf{-94.63}$		

Tabla 6.2. Balance de la masa para el periodo 1980/81 a 2027/28 para el escenario 2.

Balance de la masa de agua para la serie $2010/11-2026/27$ (en hm ³ /año)						
Entradas		Salidas	Cambios			
Infiltración Júcar	34.12	Drenaje Júcar	95.69	$\Delta S_{ m río} = {f 61.56}$		
Infiltración Lezuza, Jardín, MC.	32.05	Bombeos	275.22			
Infiltración Lluvia	152.65					
Retornos de riego subterráneo	28.21					
Retornos de riego superficial	8.64					
Entradas subt. Mancha Occidental	-2.79					
Entradas subt. Jardín-Lezuza	32.38					
Total	285.28		370.91	$\Delta S_{acu} = \textbf{-85.64}$		

Tabla 6.3. Balance de la masa para el periodo 1980/81 a 2027/28 para el escenario 3.

Balance de la masa de agua para la serie $2010/11-2026/27$ (en hm ³ /año)						
Entradas		Salidas		Cambios		
Infiltración Júcar	30.52	Drenaje Júcar	98.81	$\Delta S_{ m río} = {f 68.29}$		
Infiltración Lezuza, Jardín, MC.	32.05	Bombeos	245.87			
Infiltración Lluvia	152.68					
Retornos de riego subterráneo	25.14					
Retornos de riego superficial	8.64					
Entradas subt. Mancha Occidental	-4.28					
Entradas subt. Jardín-Lezuza	32.18					
Total	276.94		344.68	$\Delta S_{acu} = \textbf{-67.74}$		

Tabla 6.4. Balance de la masa para el periodo 1980/81 a 2027/28 para el escenario 4.

Balance de la masa de agua para la serie $2010/11-2026/27$ (en hm ³ /año)						
Entradas		Salidas		Cambios		
Infiltración Júcar	27.23	Drenaje Júcar	102.05	$\Delta S_{ m río} = {f 74.82}$		
Infiltración Lezuza, Jardín, MC.	32.05	Bombeos	226.02			
Infiltración Lluvia	152.63					
Retornos de riego subterráneo	22.15					
Retornos de riego superficial	8.64					
Entradas subt. Mancha Occidental	-5.82					
Entradas subt. Jardín-Lezuza	32.51					
Total	269.39		328.08	$\Delta S_{acu} = \textbf{-58.68}$		

Tabla 6.5. Balance de la masa para el periodo 1980/81 a 2027/28 para el escenario 5.

6.2.2. Evolución del almacenamiento

A partir del balance para cada año se calcularon los cambios en el almacenamiento y se representaron gráficamente en las figuras 6.1 a 6.5. Las barras representan el cambio en el volumen de agua almacenado en el acuífero calculado como la diferencia entre lo que entra y lo que sale cada año hidrológico. Si se acumulan los cambios anuales en el almacenamiento se obtiene la línea continua. El vaciado del acuífero se puede apreciar a través de la pendiente negativa que la línea tiene a partir del año 2010/11, dependiendo del caudal medio anual extraído.

Es importante recordar que los valores que aparecen en las tablas 6.1 a 6.5 y en los gráficos 6.1 a 6.5, son valores medios anuales dentro de cada serie. Luego, esta información debe interpretarse como un comportamiento medio anual del sistema a lo largo del periodo analizado. Por ejemplo, si multiplicamos el valor medio perdido por el acuífero en un año (tablas 6.1 a 6.5), por el número de años de la serie, se obtiene el volumen perdido por el acuífero (último valor en los gráficos 6.1 a 6.5) a partir de la situación inicial.



Figura 6.1. Evolución del almacenamiento del acuífero para el periodo 1980/81 a 2026/27 para el escenario 1.



Figura 6.2. Evolución del almacenamiento del acuífero para el periodo 1980/81 a 2026/27 para el escenario 2.



Figura 6.3. Evolución del almacenamiento del acuífero para el periodo 1980/81 a 2026/27 para el escenario 3.



Figura 6.4. Evolución del almacenamiento del acuífero para el periodo 1980/81 a 2026/27 para el escenario 4.



Figura 6.5. Evolución del almacenamiento del acuífero para el periodo 1980/81 a 2026/27 para el escenario 5.

6.2.3. Relación entre el río y el acuífero

De igual forma que en el capítulo 5, en este apartado se analiza la relación entre el río y el acuífero discriminando los flujos entre éstos según los tramos de río establecidos en el apartado 4.1.2. Las tablas 6.6 a 6.10 muestran los balances río-acuífero para el periodo 2010/11-2026/27. Se han calculado los flujos que van del acuífero al río y del río al acuífero para cada tramo, y se han evaluado los balances en cada uno de ellos para establecer la condición del río (ganador o perdedor). Se observa que para los dos primeros escenarios, bombeos más altos, el río es perdedor en los doa primeros tramos y ganador en los segundos; y para los tres últimos escenarios el río es ganador en todos los tramos excepto en el primero.

Relación río-acuífero (en $hm^3/año$)						
Tramo	Acuífero a río	Río a acuífero	Neto $(E-S)$	Condición		
Alarcón-Picazo	0.00	0.94	-0.94	Perdedor		
Picazo-Los Frailes	26.16	44.23	-18.07	Perdedor		
Los Frailes-Alcalá del Júcar	46.32	3.76	42.56	Ganador		
Alcalá del Júcar-Salida del sistema	13.47	0.00	13.47	Ganador		
Total	85.95	48.93	$\Delta S_{ m río} =$	37.01		

Tabla 6.6. Relación entre el río y el acuífero para el periodo 2010/11-2026/27 para el escenario 1.

Relación río-acuífero (en $hm^3/año$)							
Tramo	Acuífero a río	Río a acuífero	Neto $(E-S)$	Condición			
Alarcón-Picazo	0.00	0.94	-0.94	Perdedor			
Picazo-Los Frailes	32.29	33.18	-0.89	Perdedor			
Los Frailes-Alcalá del Júcar	47.77	3.35	44.42	Ganador			
Alcalá del Júcar-Salida del sistema	13.54	0.00	13.54	Ganador			
Total	93.59	37.47	$\Delta S_{ m río} =$	56.13			

Tabla 6.7. Relación entre el río y el acuífero para el periodo 2010/11-2026/27 para el escenario 2.

Relación río-acuífero (en $hm^3/año$)						
Tramo	Acuífero a río	Río a acuífero	Neto $(E-S)$	Condición		
Alarcón-Picazo	0.00	0.94	-0.94	Perdedor		
Picazo-Los Frailes	34.07	29.93	4.14	Ganador		
Los Frailes-Alcalá del Júcar	48.06	3.25	44.81	Ganador		
Alcalá del Júcar-Salida del sistema	13.55	0.00	13.55	Ganador		
Total	95.96	34.12	$\Delta S_{\rm río} =$	61.56		

Tabla 6.8. Relación entre el río y el acuífero para el periodo 2010/11-2026/27 para el escenario 3.

Relación río-acuífero (en $hm^3/año$)						
Tramo	Acuífero a río	Río a acuífero	Neto $(E-S)$	Condición		
Alarcón-Picazo	0.00	0.94	-0.94	Perdedor		
Picazo-Los Frailes	36.67	26.45	10.22	Ganador		
Los Frailes-Alcalá del Júcar	48.56	3.12	45.43	Ganador		
Alcalá del Júcar-Salida del sistema	13.58	0.00	13.58	Ganador		
Total	98.81	30.52	$\Delta S_{ m río} =$	68.29		

Tabla 6.9. Relación entre el río y el acuífero para el periodo 2010/11-2026/27 para el escenario 4.

Relación río-acuífero (en $hm^3/año$)							
Tramo	Acuífero a río	Río a acuífero	Neto $(E-S)$	Condición			
Alarcón-Picazo	0.00	0.94	-0.94	Perdedor			
Picazo-Los Frailes	39.44	23.28	16.16	Ganador			
Los Frailes-Alcalá del Júcar	49.01	3.01	46.00	Ganador			
Alcalá del Júcar-Salida del sistema	13.59	0.00	13.59	Ganador			
Total	102.05	27.23	$\Delta S_{ m río} =$	74.82			

Tabla 6.10. Relación entre el río y el acuífero para el periodo 2010/11-2026/27 para el escenario 5.

6.2.4. Evolución de la piezometría

Finalmente, se presenta la evolución de los niveles piezométricos para algunos de los pozos utilizados durante la calibración del modelo. En la figura 4.13 se representan las localizaciones de dichos piezómetros. Como ya se ha dicho, se muestra la evolución de cuatro piezómetros por cada uno de los principales dominios hidrogeológicos, y de cuatro cercanos al río. En las figuras 6.6 a 6.10 se pueden ver dichas evoluciones.



Figura 6.6. Evolución de los niveles piezométricos en 4 piezómetros del Dominio Central.



Figura 6.7. Evolución de los niveles piezométricos en 4 piezómetros del Dominio Moro-Nevazos.



Figura 6.8. Evolución de los niveles piezométricos en 4 piezómetros del Dominio Septentrional.



Figura 6.9. Evolución de los niveles piezométricos en 4 piezómetros del Dominio Salobral-Los Llanos.



Figura 6.10. Evolución de los niveles piezométricos en 4 piezómetros cercanos al río.

Conclusiones

Este informe describe con detalle el diseño y la puesta en funcionamiento de un modelo de flujo subterráneo de los acuíferos del SMO. Las principales características de este modelo en relación a los anteriormente realizados en esta zona son:

- El modelo esta basado en una descripción geológica actualizada y más realista de la región (Sanz, 2005).
- Las entradas al modelo se han cuantificado en el marco de este trabajo (Pérez-Martín, 2005; TRAGSATEC, 2010a,b), debido a las incertidumbres que sobre ellas se tenía, tal como se había indicado en Sahuquillo et al. (2008).
- Las extracciones fueron cuantificadas de una forma más realista puesto que se han deducido a partir de clasificar los cultivos vía teledetección, se han aplicado las dotaciones estimadas teniendo en cuenta el desarrollo fenológico de los cultivos (TRAGSATEC, 2010a). Todo esto se agrupó y se asigno a pozos reales de la Mancha Oriental (aprox. 2700 pozos).

7.1. Conclusiones

El modelo calibrado es una adecuada representación del SMO en cuanto a la reproducción de los balances de masa, la evolución piezométrica, las relaciones entre el río y los acuíferos y los caudales circulando por el río. Constituye hoy por hoy el mejor "repositorio" de información acerca del SMO. Esto ha permitido el mejor conocimiento hasta el momento del sistema modelado pudiéndose obtener información con cierto detalle acerca de por ejemplo, los flujos entre unidades hidrogeológicas, la relación entre dominios, la relación río acuífero, el efecto de las OPAD, y el comportamiento del punto de desconexión. Además el modelo se utilizó para predecir el futuro, simulando algunos escenarios con horizonte en el año 2026/27.

En régimen no influenciado, durante el periodo 1940/41 a 1979/80 (ver la tabla 5.1), las entradas al sistema son de 277 hm³/año mientras que las salidas son del orden de los 236 hm³/año, con lo cual el almacenamiento del acuífero habría crecido en unos 41 hm³/año. La mayoría del caudal drenado al río (95%) lo hace en el tramo entre El Picazo - Alcalá del Júcar (ver la tabla 5.5).

Sin embargo, durante los años 1980/81 a 2009/10, se produce un descenso en las entradas del orden del 20% y las salidas al río sólo se reducen un 8%, el resto proviene del almacenamiento del acuífero (ver la tabla 5.2). Los años 2008/09 y 2009/10 son excepcionales en cuanto a los

valores de infiltración (380 hm^3 y 737 hm^3 , respectivamente), por lo que tanto el drenaje al río como el almacenamiento crecen notablemente.

El funcionamiento hidrogeológico del SMO en régimen influenciado está condicionado por el aumento progresivo de las extracciones de agua subterránea. Durante el periodo de estudio, se detectan cambios notables en el flujo subterráneo que coinciden con la expansión de los cultivos de regadío. Los niveles piezométricos del SMO en el año 1982, indican que las principales direcciones de flujo convergían hacia el río. Este curso fluvial era el elemento principal de descarga natural del sistema. A partir de entonces el aumento de las extracciones de agua subterránea para abastecer los cultivos de regadío provoca modificaciones en las direcciones del flujo subterráneo.

El cambio detectado en el movimiento del agua subterránea también tiene su reflejo en la variación del almacenamiento del acuífero. En efecto, desde el año 1980/81 al 2009/10, se observa un descenso progresivo del almacenamiento del acuífero con una media anual de 121 hm³ (ver la tabla 5.9), el cual es más pronunciado entre los años 1990 y 2000. A partir de esta fecha y hasta el año 2005 se observa un suavizado de dicha variación. A partir de 2007 la tendencia al vaciado desaparece y en los dos últimos años se invierte debido al notable aumento de la recarga por infiltración del agua de precipitación (ver la figura 5.5).

En cuanto a las relaciones río-acuífero inducidas por los bombeos se observa como el río Júcar, entre las estaciones de aforo de El Picazo y Alcalá del Júcar, ha pasado de ser río ganador, con unos aportes de 150 hm³/año, a mediados de los años 80, a estar en equilibrio (ganador-perdedor) a partir del año 2000. En el tramo El Picazo - Los Frailes durante el periodo 1997/98 a 2007/08 el río cede agua al acuífero (río perdedor), con una media anual de 30 hm³. A partir de 2007/08 el río se transforma en ganador. En cuanto al tramo Los Frailes - Alcalá del Júcar, el río siempre ha sido ganador, compensando el agua perdida en el tramo anterior. Este hecho, junto con la sustitución de bombeos, ha provocado el suavizado de la variación de almacenamiento.

En lo que respecta al punto de desconexión, parece que este se ha estabilizado a unos 20 km de la estación de aforos de El Carrasco, en las proximidades del paraje de Cuasiermas. No están claras aún las características geológicas de la zona que afectan el punto de desconexión y la razón de su estabilización.

Podemos afirmar que en régimen influenciado y con los datos de entrada suministrados, el modelo ha reproducido espacio-temporalmente las interacciones río-acuífero y las elevaciones piezométricas en los pozos de manera aceptable, tanto la tendencia general como las variaciones estacionales. Los máximos y mínimos de caudal no pueden ser reproducidos por el modelo de flujo subterráneo, ya que éstos responden a avenidas y a los efectos de embalse y desembalse.

De acuerdo a lo anterior, el modelo construido ha servido para demostrar los efectos de la intensa explotación de los recursos subterráneos sobre el río Júcar. Se ha visto que la dirección preferencial del flujo subterráneo pasó de tener al río como principal zona de descarga (ganador) a dirigirse hacia las depresiones producidas por los bombeos, llegando a provocar que el río en algún tramo sea perdedor. Por otro lado, la evolución del almacenamiento del acuífero también se ve influenciada por la reducción del flujo base a causa de la intensa explotación del primero. En cuanto al punto de desconexión el río puede estar drenando menos caudal del acuífero del que drenaba antes de comenzar los bombeos. Solo cuando el río pase de ganador a perdedor es cuando se produce la desconexión y la posición de la desconexión comienza a moverse aguas abajo.

En cuanto a las predicciones, se simuló el comportamiento del sistema en el marco de distintos escenarios de bombeos. El horizonte temporal fue el año hidrológico 2026/27. Es importante señalar que los escenarios son bastante simples ya que se ha supuesto tanto unas entradas como unos bombeos uniformes a través del tiempo. Las entradas se asumieron iguales a la media anual correspondiente al periodo 1980/81 a 2009/2010. Los bombeos se fijaron en un rango que va desde los 350 a los 220 hm³/año. En todos los casos el acuífero pierde agua almacenada con un máximo de 116 hm³/año y un mínimo de 59 hm³/año, respectivamente (ver las tablas 6.1 a 6.5). Sin embargo, el río siempre se comporta como ganador con un caudal de 37 hm³/año

cuando los bombeos son de 350 $\text{hm}^3/\text{año}$ y un caudal de 75 $\text{hm}^3/\text{año}$ cuando los bombeos son de 220 $\text{hm}^3/\text{año}$ (ver las tablas 6.6 a 6.10).

7.2. En resumen...

El uso intensivo de las aguas subterráneas para regadío en el SMO ha sido el factor principal para el desarrollo socioeconómico en las últimas 4 décadas. Este hecho ha provocado importantes cambios en el funcionamiento hidrogeológico del sistema afectando también los caudales del río Júcar. Ante esta situación y de acuerdo a lo planteado en la DMA en relación al buen estado integral del sistema, se hace necesario comprender la relación existente entre el río Júcar y el SMO. En este trabajo se implementa un modelo matemático de simulación de flujo subterráneo para el complejo SMO. Dicho modelo fue desarrollado, calibrado y simulado para comprender las relaciones entre el río y el acuífero bajo los efectos de la explotación intensiva del recurso subterráneo para regadío.

Las extracciones de aguas subterráneas en este sistema han aumentado en 250 hm³ desde 1982 hasta el año 2005. Al principio de este periodo, el flujo de agua subterránea convergía hacia el río Júcar y el río era la descarga natural del acuífero. Pasados 20 años el flujo de agua subterránea se dirige hacia los conos de depresión generados por las extracciones de agua, modificando así la relación hidráulica entre el río y el acuífero. A pesar de que las extracciones han aumentado considerablemente desde comienzo de los 80 hasta el año 2000 (permaneciendo prácticamente constantes desde entonces), la variación del almacenamiento del acuífero tiende a disminuir. Este hecho es debido principalmente a la recarga inducida por los bombeos desde el río Júcar, existiendo una relación directa entre las detracciones de agua al río con respecto a las extracciones de agua subterránea y a la variación del almacenamiento del acuífero. La afección de los caudales del río es tan dramática que se ha llegado a secar en algunos tramos a mediados de los años 90 provocando que el punto de desconexión río acuífero se mueva unos 20 km aguas abajo del correspondiente a la situación previa a la puesta en marcha de los bombeos.

El modelo fue también utilizado como herramienta de predicción de cara a la implementación de las medidas necesarias para la mejor explotación del sistema de acuerdo a las indicaciones de la DMA. Para ello, se simularon diferentes escenarios que permitieron cuantificar los efectos de distintas políticas de gestión con vistas a una utilización sostenible de los recursos.

Referencias bibliográficas

- Anderson, M.P. y Woessner, W.W. (1992). Applied Groundwater Modeling. Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press, 381 pp.
- Calera A., Medrano J., Vela A. y Castaño, S. (1999). GIS Tools Applied to the Sustainable Management of Hydric Resources. Application to the Aquifer System 08-29. Agr Water Manage 40:207-220.
- Calver, A. (2001). Riverbed permeabilities: information from pooled data. Ground Water 39, (4), 546-555.
- Cassiraga, E., Sanz, D., Castaño, S., Álvarez, Ó. y Sahuquillo, A. (2011). Modelo de flujo subterráneo de los acuíferos de la Mancha Oriental y sus relaciones con el río Júcar. Informe elaborado bajo contrato con la empresa TRAGSATEC.
- Castaño, S., Sanz, D. y Gómez-Alday, J. J. (2010). Methodology for quatifying groundwater abstractions for agriculture via remote sensing and GIS. Water Resources Management (2010) 24:795-814, DOI 10.1007/s11269-009-9473-7.
- Confederación Hidrográfica del Júcar (1998). Plan Hidrológico de la Cuenca del Júcar. Ministerio de Medio Ambiente.
- Confederación Hidrográfica del Júcar (1999). Convenio para actuaciones de apoyo a la gestión hídrica en la Unidad Hidrogeológica 08.29 Mancha Oriental. Informe Interno.
- Dirección General de Obras Hidráulicas (1988). Estudio de la explotación de aguas subterráneas en el acuífero de la Mancha Oriental y su influencia sobre los caudales del río Júcar. Informe Interno.
- Dirección General de Obras Hidráulicas (1993). Estudio de seguimiento de impacto de las extracciones de aguas subterráneas en los acuíferos de la Mancha Oriental y los caudales del río Júcar.
- Estrela T., Fidalgo A., Fullana J., Maestu J., Pérez M.A., Pujante A.M. (2004). Jucar Pilot River Basin. Provisional Article 5 Report pursuant to the Water Framework Directive. Ministry for the Environment, Valencia, Spain.
- Font, E. (2004). Colaboración y desarrollo de un modelo matemático distribuido de flujo subterráneo de la Unidad Hidrogeológica 08.29 Mancha Oriental en las provincias de Albacete, Cuenca y Valencia.
- Harbough, A.W. (1990). A computer program for calculating subregional water budgets using results from the U.S. Geological Survey modular three-dimensional ground-water flow model: U.S. Geological Survey Open-File Report 90-392, 46 p.
- Instituto Geológico y Minero de España (1979). Investigación hidrogeológica de la cuenca alta de los ríos Júcar y Segura. Informe Interno.

- Instituto Geológico y Minero de España (1980). El sistema hidrogeológico de Albacete (Mancha Oriental). Sus recursos en aguas subterráneas, utilización actual y posibilidades futuras. Ed. IGME.
- Instituto Geológico y Minero de España (1984). Modelo matemático de los acuíferos de Albacete. Informe Interno.
- Instituto Geológico y Minero de España (2006). Modelo Matemático de flujo de la Unidad Hidrogeológica 08.29, Mancha Oriental. Informe Interno.
- Martín de Santa Olalla Mañas, F., Fabeiro Cortés, C., Brasa Ramos, A., Fernández González, D., López Córcoles, H. (1997). Integrated management system of an aquifer in Castilla La mancha (Spain). The irrigation Advisory Service of Albacete. Agric. Water Manage. Special Issue of the Workshop "The Use of Water In Sustainable Agriculture" 2-4 June 1997, Albacete, Spain.
- Martínez-Santos, P., Llamas, M.R. y Martínez-Alfaro, P. (2008). Vulnerability assessment of groundwater resources: a modelling-based approach to the Mancha Occidental aquifer, Spain. Environ Modell Softw, 23:1145–1162.
- McDonald, M.G., y Harbough, A.W. (1988). A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model. US Geological Survey Technical Manual of Water Resources Investigation, Book 6, US Geological Survey, Reston, Va, 586 pp.
- Pérez-Martín, 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, Universidad Politécnica de Valencia, Spain.
- Rana, G., Katerji, N. y Perinola, M. (2001) Evapotranspiration of sweet sorghum: A general model and multilocal validity in semiarid environmental conditions. Water Resources Research, 37 (12): 3237-3246.
- Ruiz, J. M. (1998). Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual distribuido de simulación continua integrado con un sistema de información geográfica. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia.
- Ruiz, J.M. (1999). Modelo distribuido para la evaluación de recursos hídricos. CEDEX. ISBN:84-498-0417-5. 245p. Madrid.
- Rubio E., Torres E.A., Denia J., González, J., Calera, A. (2007). Secuencia multitemporal de imágenes en la estimación de la distribución espacial de la evapotranspiración real a escala regional. El modelo MORE. In XII Congreso Nacional de la Asociación Española de Teledetección. Mar del Plata, Argentina.
- Sahuquillo, A., Castaño, S., Cassiraga, E., Calera, A., Gómez-Alday, J. J., Peña, S. y Sanz, D. (2008). Modelo de flujo subterráneo de los acuíferos de la Mancha Oriental y sus relaciones con los ríos Júcar y Cabriel. Informe elaborado bajo convenio específico para proyecto de investigación y desarrollo entre la Confederación Hidrográfica del Júcar (CHJ), la Universidad Politécnica de Valencia (UPV), la Universidad de Castilla La Mancha (UCLM) y la Junta Central de Regantes de La Mancha Oriental.
- Sanz, D. (2005). Contribución a la caracterización geométrica de las unidades hidrogeológicas que integran el sistema de acuíferos de la Mancha oriental. Tesis Doctoral, Univ. Complutense de Madrid, 224 p.

- Sanz, D., Martínez-Alfaro, P.E., Castaño, S. y Gómez-Alday, J.J. (2005) Caracterización de los dominios hidrogeológicos individualizados en el Sistema Mancha Oriental. SE Español. Geogaceta. 38: 251-254.
- Sanz, D., Gómez-Alday, J.J., Castaño, S., Moratalla, A., De las Heras, J., Martínez-Alfaro, PM. (2009). Hydrostratigraphic framework and hydrogeological behaviour of the Mancha Oriental System (SE Spain). Hydrogeology Journal, DOI 10.1007/s10040-009-0446-y.
- TRAGSATEC (2010a). Determinación de las dotaciones de riego anuales en La Mancha Oriental. Informe interno, julio de 2010.
- TRAGSATEC (2010b). Restitución a régimen natural de las series de aportaciones del sistema Jardín-Lezuza. Informe interno, julio de 2010.
- Trescott, P.C. (1975). Documentation of a finite difference model for simulation of three dimensional ground-water flow: U.S. Geological Survey Open-File Report 75-438, 48 p.