

# Cuantificación de recursos hídricos subterráneos en la cuenca alta del Guadiana. Consideraciones respecto a las definiciones de recursos renovables y disponibles

L. Martínez Cortina, M. Mejías Moreno, J. A. Díaz Muñoz, R. Morales García y J. M<sup>a</sup> Ruiz Hernández

Instituto Geológico y Minero de España, c/Ríos Rosas, 23, Madrid  
l.martinez@igme.es; m.mejias@igme.es; j.diaz@igme.es; r.morales@igme.es; jm.ruiz@igme.es

## RESUMEN

La adaptación de la legislación española a la Directiva Marco del Agua (DMA) contempla la necesidad de cuantificar los recursos hídricos subterráneos atendiendo a la nueva división hidrológica en masas de agua subterránea (MASb). Además, dicha cuantificación debe hacerse en base a los criterios establecidos en los documentos oficiales, derivados de la propia DMA. Desde un punto de vista cuantitativo, esto requiere la determinación de los definidos como *recursos disponibles* para cada MASb. Como forma más adecuada de acercarse al conocimiento hidrogeológico cuantitativo del sistema, se ha llevado a cabo una estimación de los balances hídricos detallados de cada una de las MASb de la cuenca alta del Guadiana (CAG) en diversas situaciones, históricas y actuales. El artículo analiza posteriormente las definiciones establecidas en los documentos de Planificación Hidrológica respecto a los recursos subterráneos renovables y disponibles, y trata de aplicar dichas definiciones estimando los valores correspondientes en las MASb de la CAG. Se ponen de manifiesto algunas dificultades derivadas de intentar aplicar dichos conceptos con criterios hidrogeológicos, por lo que se sugiere la necesidad de su revisión o adaptación. Por otra parte, se analiza la posible evolución futura del sistema hidrológico de la CAG. Desde el punto de vista del balance, la actual situación alterada del sistema supone una reducción de la evapotranspiración en unos 125-150 Mm<sup>3</sup>/año. Se sugiere que esta disminución en las *salidas de los acuíferos* sea aprovechada para la recuperación de niveles piezométricos. Como cifras orientativas de comportamiento a medio plazo (y con los matices que se desarrollan en el artículo), puede estimarse que una extracción global en la CAG de unos 275 Mm<sup>3</sup>/año produciría en las zonas más afectadas del sistema un ascenso de niveles medio aproximado de un metro anual, aunque con esta cifra existiría un límite en cuanto a la recuperación piezométrica. Sería necesario un valor futuro mantenido de las extracciones por debajo de los 200 Mm<sup>3</sup>/año para conseguir la recuperación de antiguas zonas de descarga como los Ojos del Guadiana, al menos estacionalmente, en secuencias húmedas. Con valores por debajo de los 125 Mm<sup>3</sup>/año podría hablarse ya de una recuperación notable en cuanto a zonas de descarga.

Palabras clave: balance hídrico, cuenca alta del Guadiana, recursos disponibles, recursos renovables, relación aguas superficiales-subterráneas

## ***Estimation of groundwater resources in the upper Guadiana basin together with some observations concerning the definitions of renewable and available resources***

### ABSTRACT

*The European Union Water Framework Directive requires the quantification of groundwater resources according to the new hydrogeological classification into groundwater bodies (GWBs). This evaluation is to be made taking into account the established criteria deriving from the directive, which requires an estimation of the so-called available groundwater resources for each GWB. The quantification of detailed water balances for each GWB of the upper Guadiana basin has been undertaken bearing in mind different historical and current conditions. This study further examines the definitions made by the official documents concerning hydrological planning with regard to renewable and available groundwater resources, and attempts to apply them to the upper Guadiana basin. In the light of new problems arising with regard to the hydrogeological criteria applied to these definitions, a revision of the defined concepts is suggested. This paper also analyses the possibilities of future evolution of the hydrological system in the upper Guadiana basin, and provides some recommendations for groundwater exploitation with the aim of achieving the environmental recovery of the system.*

*Key words: available groundwater resource, renewable groundwater resource, surface water-groundwater relationship, upper Guadiana basin, water balance*

### Introducción

La cuenca alta del río Guadiana (en adelante CAG) se caracteriza hidrológicamente por la significativa inte-

rrelación entre las aguas superficiales y las subterráneas. Sus características geológicas y de relieve otorgaban a esta zona semiárida su principal singularidad: la presencia de más de un centenar de

humedales, generalmente en zonas deprimidas del terreno, en un conjunto que bajo el nombre de La Mancha Húmeda, y con una superficie máxima de encharcamiento de unos 250 km<sup>2</sup>, fue declarado por la UNESCO, en 1980, Reserva de la Biosfera.

En los años 70 del pasado siglo, la mejora y abaratamiento de las técnicas de perforación de pozos, el gran avance de la ciencia hidrogeológica, y especialmente la invención de la bomba de turbina, ejercieron de motores iniciales de un desarrollo intensivo del regadío con aguas subterráneas, que originó una imparable escalada de las extracciones de agua. Esto trajo consigo, en el contexto de los años 1970s y 1980s, un notable progreso económico y social en la región, impulsado por el sector agrícola como ocupación primordial y con una notable actividad industrial girando en torno a la agricultura. Junto a estos beneficios, se produjeron cambios muy importantes en la hidrología general de la cuenca. La principal consecuencia negativa de estos cambios fue el grave impacto ecológico sufrido por muchas de las zonas húmedas, situadas principalmente en la Llanura Manchega, en la zona central de la CAG. Sirva como dato que en los últimos 30 años se ha producido en dicha zona central un descenso piezométrico medio de unos 25 m, pudiendo estimarse el vaciado de reservas de los acuíferos en unos 3.000 Mm<sup>3</sup> (Mejías *et al.*, 2009). Hoy día, los caudales en El Vicario, punto de cierre de la CAG, han quedado reducidos a la escorrentía superficial que se produce en episodios meteorológicos muy húmedos, como el que se ha producido en 2010.

La singularidad de la zona y de los procesos ocurridos ha motivado que la CAG sea objeto de interés desde muy distintos campos del conocimiento, y lugar de referencia a nivel nacional e internacional por sus implicaciones hidrológicas, medioambientales y socioeconómicas. Asimismo, la CAG ha sido protagonista de un gran número de leyes y otras decisiones administrativas que han intentado, con mayor o menor éxito, racionalizar el aprovechamiento de los recursos hídricos.

En este contexto, la cuantificación de los recursos hídricos subterráneos de la CAG, tanto en lo que se refiere a los almacenados, como a los que se recargan anualmente, o a los que podrían -o deberían- aprovecharse, ha sido tradicionalmente uno de los aspectos más planteados desde el punto de vista del conocimiento hidrogeológico.

En la actualidad, la adaptación a la Directiva Marco de la Unión Europea (DMA) (CE, 2000) lleva a la necesidad de cuantificar los recursos desde el punto de vista de la nueva división hidrogeológica en masas de agua subterránea (en adelante, MASb). Además, se

requiere la determinación de los definidos como recursos disponibles en cada MASb.

Por otro lado, el propio espíritu de la DMA, y el buen desarrollo de leyes como el Plan Especial del Alto Guadiana (que contiene un conjunto de medidas planteadas sobre la base de la recuperación medioambiental del sistema), requieren del análisis de la evolución previsible de los acuíferos y zonas húmedas en función de las decisiones hidrológicas adoptadas sobre la extracción de agua subterránea.

La determinación de los recursos hídricos subterráneos, y el análisis de la posible evolución del sistema hidrológico de la CAG, son los dos aspectos centrales tratados en este artículo, en el que se incide en la importancia conceptual de los términos que se están cuantificando y en el conocimiento del comportamiento del sistema, pues se considera que las cifras por sí solas no representan suficientemente el conocimiento del mismo.

Las estimaciones, consideraciones y conclusiones con respecto a los aspectos recogidos en el artículo son fruto de los trabajos que el IGME viene realizando en la zona desde principios de los años 1970s, de los estudios llevados a cabo entre el IGME y la Confederación Hidrográfica del Guadiana (CHG) en el marco del Convenio de Colaboración suscrito entre ambos organismos en 2007, de los trabajos de apoyo a la planificación hidrológica que el IGME ha llevado a cabo para la CHG en el actual desarrollo del plan hidrológico de cuenca, y de la experiencia y conocimiento de la zona por parte de los autores.

## **Descripción general de la zona de estudio**

### **Marco geográfico**

La CAG (Figura 1) se localiza en la submeseta meridional castellana, en la zona más oriental de la cuenca hidrográfica del mencionado río. Comprende la cuenca drenada por el río Guadiana hasta la zona ocupada actualmente por el embalse de El Vicario, en las cercanías de Ciudad Real.

Atendiendo a su divisoria de aguas superficiales, ocupa una extensión de unos 18.900 km<sup>2</sup>, de los más de 55.500 km<sup>2</sup> que componen la demarcación española de la cuenca hidrográfica del río Guadiana. La CAG distribuye su superficie entre las provincias de Ciudad Real (casi el 50%), Cuenca (casi el 25%), Toledo y Albacete, todas ellas pertenecientes a la Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha.

Los límites naturales de la CAG son: la Sierra de Altomira al norte, los Montes de Toledo al oeste, los Llanos de Albacete en el este, y la penillanura del

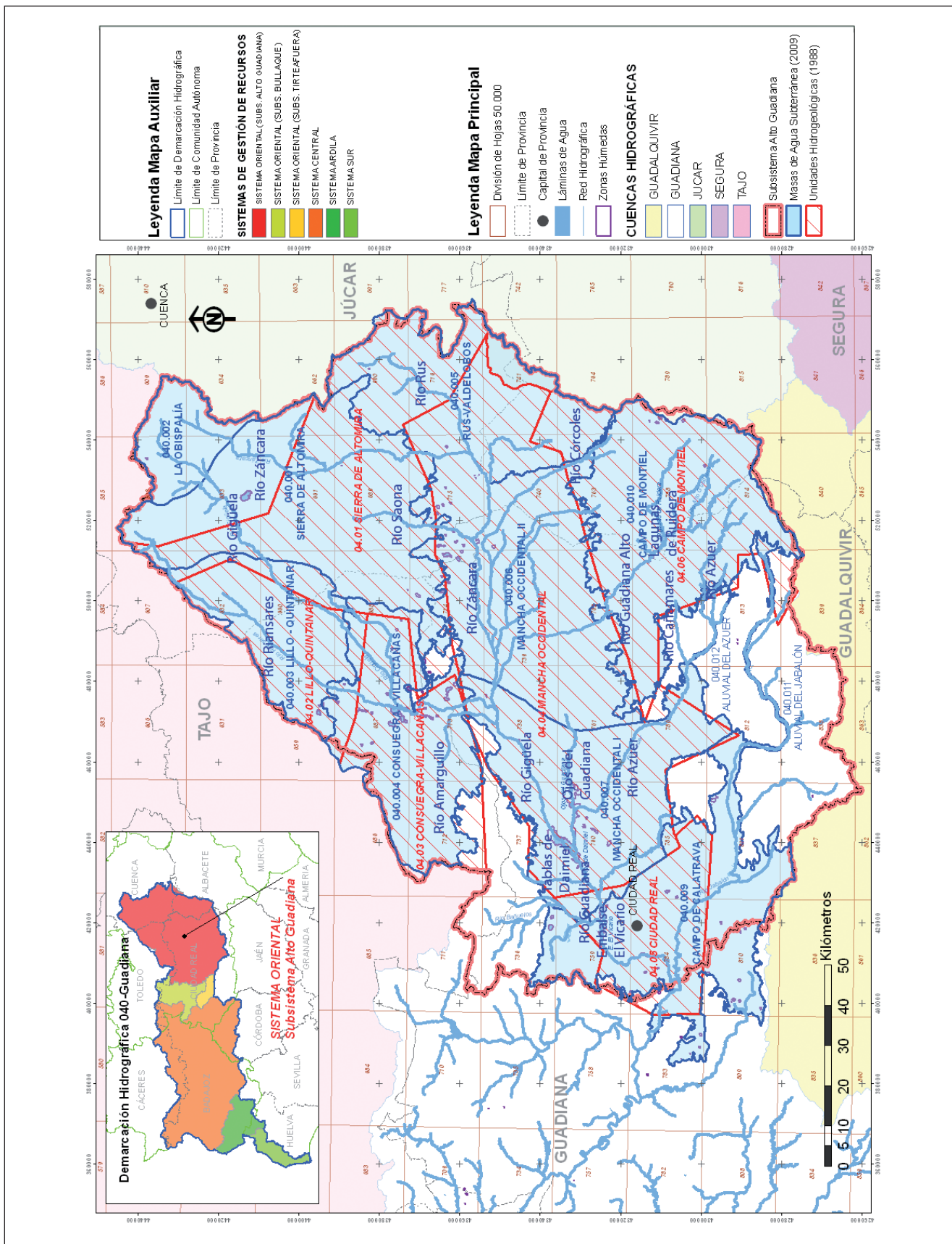


Figura 1. Mapa de la cuenca alta del río Guadiana, con la división en unidades hidrogeológicas y masas de agua subterránea.  
Figure 1. Map of the upper Guadiana river basin, showing its hydrogeological units and groundwater bodies.

Campo de Montiel en el sur. Orográficamente se caracteriza por un suave relieve, por lo que la zona central es conocida como Llanura Manchega. En toda esa zona la cota está ligeramente por encima de los 600 m s.n.m., mientras que hacia las zonas de serranía la cota aumenta, hasta alcanzar los 1.200 m s.n.m.

### **Marco climatológico**

La CAG tiene un clima de tipo mediterráneo-continental, marcado por su lejanía al mar y el relativo aislamiento que producen las cadenas montañosas que la circundan.

Los registros de temperatura se caracterizan por marcadas oscilaciones térmicas, con valores que pueden alcanzar hasta -10°C en invierno y 40°C en verano. Las temperaturas medias de los meses de enero y julio están en torno a los 5°C y 25°C respectivamente. La temperatura media de la región es del orden de 14°C.

La precipitación media anual se sitúa en torno a los 425 mm/año. Si consideramos su contribución específica a la escorrentía, es la más seca entre las cuencas y subcuencas españolas de un tamaño comparable con una escorrentía total media que apenas alcanza los 30 mm/año (Martínez Cortina, 2003).

El reparto de la precipitación es muy desigual, tanto interanualmente como estacionalmente. Hay años con una precipitación media inferior a los 250 mm, mientras que en el extremo opuesto hay años con precipitaciones superiores a los 600 mm. Estadísticamente hay más años con valores inferiores a la precipitación media, pero los años húmedos se desvían más de la media.

Las precipitaciones más importantes suelen tener lugar en los meses de noviembre a enero, con otro máximo relativo en abril y mayo. Para el conjunto de la cuenca puede extrapolarse una precipitación media en abril o noviembre de unos 50-60 mm/mes. Por su parte, los meses más secos son julio y agosto, con valores medios del orden de 5-15 mm/mes. Es bastante frecuente que las lluvias tengan un carácter tormentoso, con fuertes aguaceros de escasa duración localizados geográficamente en una zona relativamente reducida (Martínez Cortina, 2001).

La variabilidad espacial de la precipitación a lo largo de la cuenca, en cuanto a valores medios, no es demasiado alta. La mayor parte tiene valores históricos medios entre 400 y 500 mm/año. Es en las zonas más elevadas, en las cabeceras de los ríos, donde se sobrepasan estos valores.

Así, en la zona central (Mancha Occidental I y II), el valor medio anual se sitúa en torno a los 400-425 mm.

Hacia la zona occidental (Rus-Valdelobos), y en zonas cercanas al Campo de Montiel, la precipitación media está en torno a los 450 mm/año. A medida que nos alejamos de la Llanura Manchega y aumenta la cota topográfica, lo hace también el valor de la precipitación media histórica. Al norte llegan a alcanzarse valores medios de unos 500 mm/año en la zona de cabecera del río Riansares, y 550-600 mm/año en las cabeceras de Záncara y Gigüela. En Montiel, con una precipitación media de unos 450 mm/año, se superan los 500 mm/año en las zonas más elevadas, como las cabeceras de los ríos Azuer y Cañamares, o en la zona oriental y suroriental.

### **Marco hidrogeológico administrativo**

Desde un punto administrativo, los acuíferos de la CAG han sido clasificados según varias divisiones y denominaciones en los últimos 30 años, atendiendo a diferentes criterios geológicos, hidrogeológicos, o simplemente de gestión hidrológica. Estas divisiones se iniciaron con la clasificación en sistemas acuíferos establecida por el Programa Nacional de Investigación de Aguas Subterráneas (PNIAS) (ITGE, 1979), basado principalmente en la cartografía hidrogeológica. En 1988 se adoptó la división en Unidades Hidrogeológicas, definidas con una mezcla de criterios administrativos e hidrogeológicos (DGOH-ITGE, 1988). Por último, la DMA (CE, 2000) ha establecido como unidad de gestión la masa de aguas subterráneas (MASb) (MMA-DGA, 2005).

En la Tabla 1 puede verse resumida esta evolución de la clasificación hidrogeológica administrativa de los acuíferos de la CAG.

En lo que respecta a la evaluación de los recursos hídricos subterráneos, estas diferentes clasificaciones dificultan el análisis de los estudios históricos existentes, pues las distintas estimaciones no suelen estar referidas a ámbitos territoriales coincidentes.

### **Funcionamiento hidrológico de la cuenca alta del Guadiana**

#### **Comportamiento en régimen natural**

El funcionamiento hidrológico de la cuenca alta del Guadiana en régimen natural, está caracterizado por la gran interrelación existente entre las aguas superficiales y las subterráneas.

La zona central del sistema, que en la actualidad comprende principalmente las MASb de Mancha Occidental I, Mancha Occidental II y Rus-Valdelobos,

Sistemas acuíferos (S.A. nº) (1979)	Sup. (km <sup>2</sup> )	Unidades Hidrogeológicas (UH) (1988)	Sup. (km <sup>2</sup> )	Masas de Agua Subterránea (MASb) (2005)	Sup. (km <sup>2</sup> )
S-19 (S.A. nº 19) Sierra de Altomira	4.370	UH 04.01 Sierra de Altomira	2.706	040.001 Sierra de Altomira	2.575
				040.002 La Obispalía	489
S-20 (S.A. nº 20) Mancha de Toledo	3.400	UH 04.02 Lillo-Quintanar UH 04.03 Consuegra-Villacañas	1.013 1.202	040.003 Lillo-Quintanar	1.101
				040.004 Consuegra-Villacañas	1.605
S-23 (S.A. nº 23) Mancha Occidental	5.000	UH 04.04 Mancha Occidental	5.126	040.005 Rus-Valdelobos *	1.716
				040.006 Mancha Occidental II	2.396
				040.007 Mancha Occidental I	2.002
		UH 04.05 Ciudad Real	1.050	040.009 Campo de Calatrava	2.022
S-24 (S.A. nº 24) Campo de Montiel	2.700	UH 04.06 Campo de Montiel	2.582	040.010 Campo de Montiel	2.198
	15.470		13.682		16.109

\* El ámbito geográfico de la masa de aguas subterráneas de Rus-Valdelobos comprende zonas que correspondían a las unidades hidrogeológicas de Sierra de Altomira, Mancha Occidental y Campo de Montiel.

Tabla 1. Evolución de la división administrativa de los acuíferos de la cuenca alta del Guadiana (sistemas acuíferos, unidades hidrogeológicas, masas de agua subterránea).

*Table 1. Development of the administrative classification of the aquifers in the upper Guadiana basin (aquifer systems, hydrogeological units, groundwater bodies).*

es conocida como la Llanura Manchega por sus características topográficas, y resulta clave en el funcionamiento de todo el sistema, actuando básicamente como colector del mismo (Cruces y Martínez Cortina, 2000).

Las entradas de agua en dichas masas centrales proceden de la recarga directa de la lluvia, de los flujos laterales de otros acuíferos con niveles piezométricos más altos (más importantes en el caso de Mancha Occidental II), y de la infiltración de los ríos, cuando sus cauces están por encima del nivel piezométrico (Záncara, Guadiana al salir del Campo de Montiel, Azuer). Las salidas en régimen natural se producen por drenaje del acuífero en las zonas de descarga (particularmente importantes en los Ojos del Guadiana y Tablas de Daimiel), y por evapotranspiración desde las zonas húmedas y las riberas de los ríos. En esta situación natural la circulación del agua subterránea tenía un sentido general hacia el oeste. La Figura 2 muestra un perfil longitudinal muy esquemático de la zona central, desde las zonas de descarga en el oeste (Mancha Occidental I) a las áreas de recarga en el este (Rus-Valdelobos). La superficie libre señalada para 1972 puede considerarse representativa de una situación del sistema (respecto a niveles) cercana a la natural.

Las interacciones con las MASb adyacentes, especialmente con las de Sierra de Altomira al norte y Campo de Montiel al sur, son complejas, con conexiones no muy claramente definidas, debido a las

complicadas características geométricas, hidrogeológicas y estructurales de las zonas de contacto. Además, en el extremo oriental del sistema, donde se sitúa la MASb Rus-Valdelobos, existe un límite hidrogeológico con la MASb Mancha Oriental (cuenca del Júcar), que cambia ligeramente de posición según las variaciones de los niveles piezométricos.

Al sur del sistema, la MASb de Campo de Montiel es un acuífero de tipo kárstico, muy fracturado, constituido principalmente por materiales jurásicos. Funciona como un acuífero libre, con un comportamiento del flujo subterráneo muy condicionado por las fracturas existentes y su dirección, mientras que su piezometría se caracteriza por oscilaciones notables relacionadas con episodios de lluvias importantes o secuencias secas. La lluvia constituye su fuente de recarga, mientras que la descarga se produce principalmente a través de manantiales situados principalmente en los bordes oeste y sur de la masa, o bien inmersos dentro de la misma (Montero, 1994), dando lugar a ríos como el Guadiana Alto, Azuer, Cañamares o Jabalón. La mayor parte del flujo subterráneo se transfiere hacia la Llanura Manchega, bien superficialmente a través de la escorrentía generada en el Guadiana Alto, o bien a través de la transferencia lateral hacia los acuíferos de Mancha Occidental II y Rus-Valdelobos, cuantitativamente importante, como se verá posteriormente en los balances hídricos.

Por lo que respecta a las masas situadas al norte de la Llanura Manchega, la MASb de la Sierra de

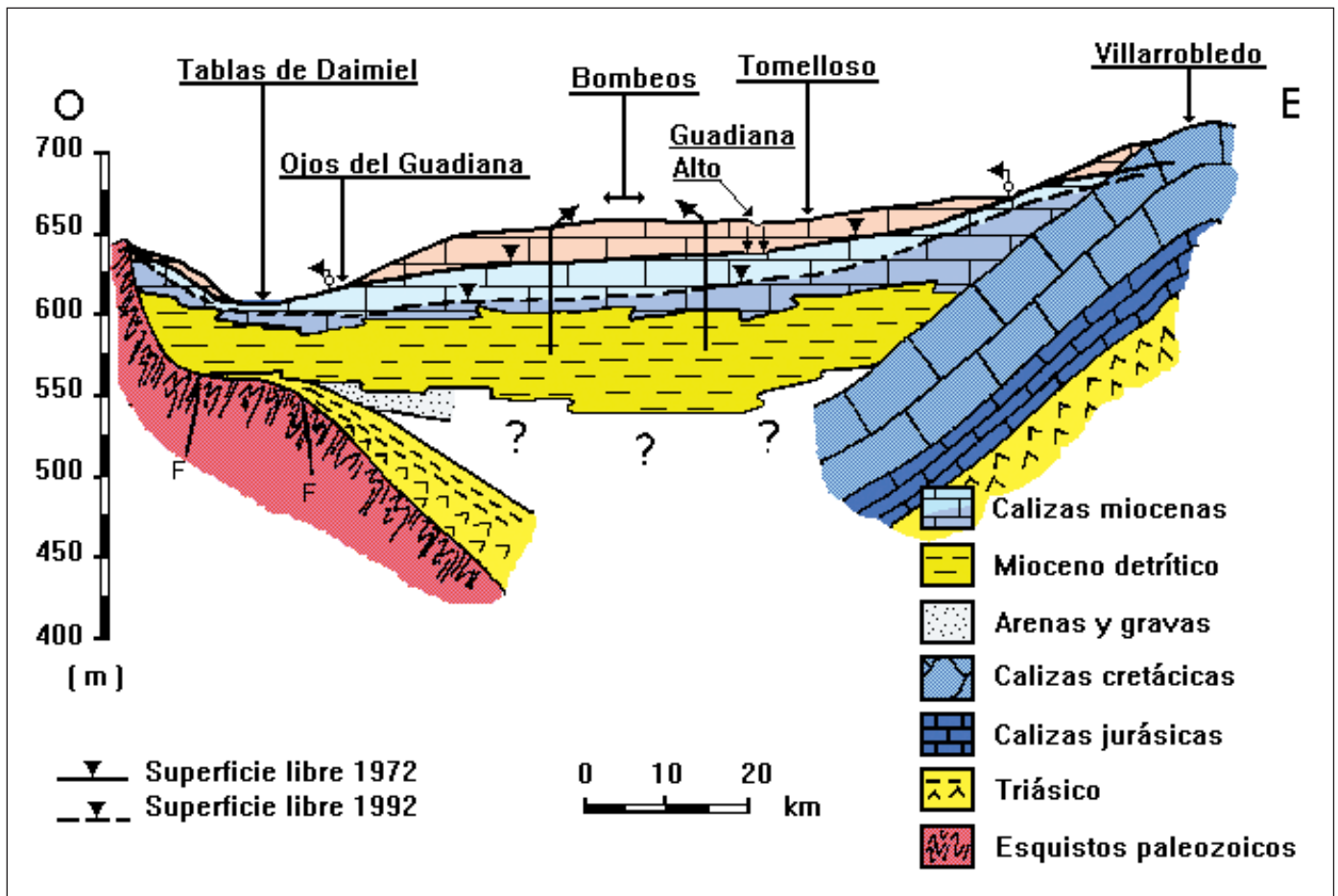


Figura 2. Perfil longitudinal de la Llanura Manchega (masas de agua subterránea de Mancha Occidental I, Mancha Occidental II y Rus-Valdelobos) (García Rodríguez y Llamas, 1992).  
 Figure 2. Cross section of the Llanura Manchega (groundwater bodies of Mancha Occidental I, Mancha Occidental II and Rus-Valdelobos) (García Rodríguez and Llamas, 1992).

Altomira se recarga principalmente por la infiltración del agua de lluvia y de la escorrentía superficial, mientras que la descarga natural se produce por drenaje hacia los ríos, a través de manantiales, y por descargas laterales hacia la Llanura Manchega y hacia las masas de Lillo-Quintanar y Consuegra-Villacañas. En su parte más septentrional el drenaje tiene lugar hacia el río Gigüela, mientras que en su zona meridional el agua circula hacia los ríos Záncara, Saona y Rus, y hacia las comentadas masas adyacentes.

En las MASb de Lillo-Quintanar y Consuegra-Villacañas, la recarga se produce por infiltración de la lluvia, y en algunas zonas por infiltración de ríos, especialmente durante el estiaje. El sentido de circulación del agua en los acuíferos triásico y mioceno tiene una clara componente hacia los ríos Riansares y Gigüela. En el acuífero cámbrico la circulación es hacia el norte, con drenaje hacia el río Amarguillo.

Otras descargas del sistema se producen por evapotranspiración en zonas encharcadas y por escorrentía subterránea hacia la Llanura Manchega.

#### **La capacidad de autorregulación de los acuíferos de la cuenca alta del Guadiana**

Partiendo de una hipotética situación histórica en la que no se extraía agua de los acuíferos, el sistema en su conjunto (considerada su divisoria hidrogeológica), puede considerarse en una situación *media* de equilibrio, con unas entradas procedentes de la recarga de la lluvia y de la infiltración de los ríos en tramos en que estos son influentes; y unas salidas equivalentes constituidas por las descargas a ríos y zonas húmedas en las zonas de drenaje del sistema, y por la evapotranspiración desde el propio acuífero, en

zonas con el nivel freático cercano a la superficie. Estas descargas contribuían a mantener unos determinados valores de la escorrentía subterránea en el caudal de los ríos y una cierta superficie de zonas húmedas.

En esta situación natural del acuífero, las secuencias húmedas o secas producen ligeros ascensos o descensos de los niveles piezométricos en torno a la posición de equilibrio. Esto se traduce en pequeñas variaciones de las descargas de los acuíferos, y por tanto del caudal circulante por los ríos. El consiguiente aumento o disminución de las áreas inundadas y de descarga, incide a su vez en la existencia de un mayor o menor volumen de evapotranspiración, que viene a compensar en cierta medida el balance del sistema, contribuyendo a mantener los niveles próximos a unos valores medios. Este comportamiento es representativo de la capacidad de autorregulación de los acuíferos de la CAG.

Esta autorregulación se pone también de manifiesto cuando en dichos acuíferos comienza a realizarse un aprovechamiento de las aguas subterráneas. Inicialmente se produce un descenso (en principio pequeño si las extracciones lo son), de los niveles piezométricos, y una disminución de las descargas a los ríos y zonas húmedas, lo que se traduce en un menor caudal circulante por los ríos y una reducción de la superficie de humedales. A su vez, esto conlleva una disminución de la salida por evapotranspiración.

Mientras existe conexión entre los acuíferos y las corrientes superficiales y zonas húmedas, se mantiene este comportamiento autorregulador.

### Comportamiento en régimen perturbado

Con la intensa explotación de las aguas subterráneas, producida especialmente en la Llanura Manchega a partir de la década de los 70 del pasado siglo, el funcionamiento del sistema ha sufrido importantes modificaciones. El descenso de los niveles piezométricos (Figura 3) ha hecho que en las masas centrales del sistema el acuífero haya quedado descolgado de las corrientes superficiales. A partir de ese momento se rompe el comportamiento autorregulador anteriormente analizado (Martínez Cortina, 2003).

Esta desconexión supone la desaparición de la aportación subterránea del acuífero al caudal de los ríos. Así, las áreas húmedas se han reducido drásticamente, y muchas zonas y ríos que antes recibían la descarga del acuífero, han pasado a ser áreas de recarga, donde se produce infiltración. El esquema de flujo se encuentra ahora condicionado en muchos lugares por los descensos de nivel producidos. Por

ejemplo, la formación de conos de bombeo en la parte central y occidental de la Llanura Manchega hace que el flujo se dirija desde los contornos del sistema hacia dicha zona central. En esta situación perturbada, que es la que se ha producido en la zona central del sistema (masas de Mancha Occidental I, Mancha Occidental II y Rus-Valdelobos) los cauces se limitan a recoger la escorrentía superficial, que con frecuencia se infiltra totalmente en los acuíferos sin llegar al final de la cuenca, al embalse de El Vicario.

Es importante diferenciar este comportamiento de las masas centrales de la CAG con las MASb laterales. Dadas sus características, las masas situadas al norte de las tres anteriores (La Obispalía, Sierra de Altomira, Lillo-Quintanar y Consuegra-Villacañas) no han tenido una extracción de aguas subterráneas significativas en comparación con las de la Llanura Manchega, salvo en las zonas más próximas a la misma, y los problemas de alteraciones sobre el régimen natural son más moderados.

En el caso de la MASb del Campo de Montiel, su carácter kárstico y fracturado produce un comportamiento muy condicionado por la pluviometría y caracterizado por notables oscilaciones piezométricas. A su vez, estas oscilaciones condicionan de forma muy estacional la situación de las zonas húmedas de la masa, y en concreto de las Lagunas de Ruidera, un conjunto de lagunas escalonadas que discurren en dirección noroeste dentro del Campo de Montiel. El acuífero no ha sufrido alteraciones drásticas con respecto a su funcionamiento en régimen natural, como sucedía en las masas centrales de la

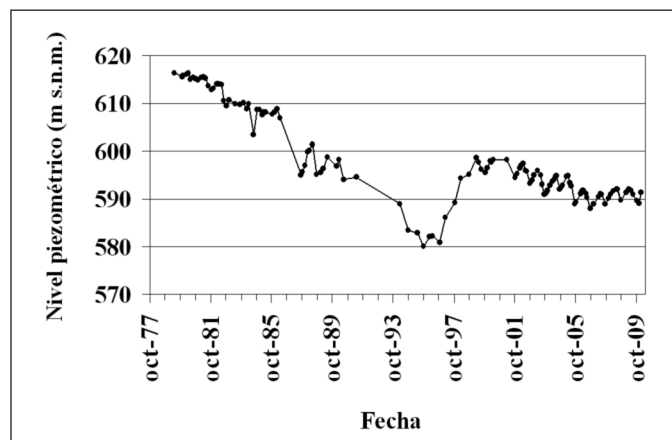


Figura 3. Evolución piezométrica en un punto de control del IGME (1930-40040) cercano a los Ojos del Guadiana (término municipal de Villarrubia de los Ojos) (Mejías *et al.*, 2009).

Figure 3. Evolution of the phreatic level according to piezometer 1930-40040, located in Villarrubia de los Ojos near Ojos del Guadiana and monitored by IGME. (Mejías *et al.*, 2009).

cuenca. Las importantes oscilaciones de los niveles piezométricos obedecen más en este caso a las secuencias pluviométricas que a las extracciones de agua, que se mantienen en valores moderados. Desde un punto de vista cuantitativo, el descenso generalizado de niveles en las masas de Mancha Occidental II y Rus-Valdelobos, a las que descarga lateralmente el acuífero del Campo de Montiel, ha inducido un cierto incremento de dicha transferencia (Martínez Cortina, 2008), que se cuantifica de forma aproximada en el apartado de balances hídricos.

### **La cuantificación de recursos subterráneos en la planificación hidrológica**

Los términos y definiciones establecidos de forma oficial en los instrumentos de Planificación Hidrológica, derivados de definiciones bastante genéricas procedentes de la DMA (CE, 2000), no siempre tienen una interpretación hidrogeológica clara. De ahí que, en general, su estimación no se esté haciendo de una forma homogénea y que no siempre esté claro el concepto representado por las cifras obtenidas.

Así, la Instrucción de Planificación Hidrológica (IPH) (BOE, 2008) dice que "el recurso disponible en las MASb se define como el valor medio interanual de la tasa de recarga total de la MASb, menos el flujo interanual medio requerido para conseguir los objetivos de calidad ecológica para el agua superficial asociada para evitar cualquier disminución significativa en el estado ecológico de tales aguas, y cualquier daño significativo a los ecosistemas terrestres asociados".

Añade la IPH: "El recurso disponible se obtendrá como diferencia entre los recursos renovables (recarga por la infiltración de la lluvia, recarga por retorno de regadío, pérdidas en el cauce y transferencias desde otras MASb) y los flujos medioambientales requeridos para cumplir con el régimen de caudales ecológicos y para prevenir los efectos negativos causados por la intrusión marina".

De acuerdo con este último párrafo, la IPH parecería asimilar los recursos renovables al conjunto de todas las entradas que recibe la MASb. El concepto de recursos renovables no aparece definido de otra manera en ningún documento de Planificación Hidrológica. Sería necesario definir claramente a qué se hace referencia cuando se habla de recursos renovables, y aún así, la aplicación práctica del valor obtenido difícilmente tiene un sentido hidrogeológico claro.

Por lo que respecta al recurso disponible, se trata también de un concepto de difícil definición práctica. La determinación de su valor, especialmente en la situación en la que se encuentran muchos de los acu-

íferos españoles, lleva generalmente a la necesidad de estimar su valor utilizando criterios que van más allá de lo puramente hidrológico, como a continuación se analizará para el caso de la CAG.

### **La cuantificación de recursos subterráneos en la cuenca alta del Guadiana**

La cuantificación de los recursos subterráneos de la CAG ha sido, tradicionalmente, uno de los principales retos en el ámbito del conocimiento hidrológico del sistema.

En los numerosos trabajos desarrollados hasta la fecha sobre la CAG, o sobre alguna zona parcial de la misma, pueden encontrarse diversos intentos de confeccionar balances hídricos o de cuantificar de alguna manera los recursos hídricos subterráneos (ITGE, 1979; ITGE, 1981; MOPU-IGME, 1988; Martínez Cortina, 2001; CHG, 2008; CHG, 2009; IGME, 2010). Es difícil comparar unos con otros o tratar de realizar una síntesis basada en varios de ellos, debido a los distintos ámbitos geográficos de cada trabajo, y a la diferente forma de plantear los términos y el concepto del balance. Así, términos como *recarga*, *recarga de la lluvia*, *infiltración*, *recarga natural*, *recarga neta*, *recarga eficaz*, *recarga indirecta*, *recursos renovables*, *recursos disponibles*, *escorrentía subterránea*, *componente base*, *flujo base*, *aportación subterránea* y otros, son utilizados sin la existencia de un criterio científico común claro, lo que suele inducir a confusión (Llamas *et al.*, 2001). Tampoco las definiciones oficiales ayudan a clarificar este tema, pues no siempre parecen responder a los conceptos a los que tratan de hacer referencia, como se verá posteriormente.

### **Consideraciones respecto al balance hídrico de un acuífero**

Se ha considerado oportuno destacar algunos conceptos básicos relacionados principalmente con la extracción de aguas subterráneas de un acuífero y su repercusión en los balances hídricos y en el funcionamiento de un sistema hidrológico en su conjunto, y que no son en ocasiones tenidos en cuenta adecuadamente.

En primer lugar hay que recordar que toda extracción de agua de un acuífero, por pequeña que sea, tiene una incidencia en el balance hídrico del sistema. En una cuenca como la del Alto Guadiana, caracterizada por unas relaciones especialmente importantes entre acuíferos, ríos y zonas húmedas, las extracciones (desde el primer momento) producen una reduc-



ción de las descargas de los acuíferos a los ríos y a las zonas húmedas, y una disminución de la superficie de estas últimas, y por tanto de la evapotranspiración. Quiere ello decir que más allá de la utilización más o menos acertada de términos como *recursos renovables*, ninguna cantidad de la que se recarga en un acuífero es extraída sin modificar estrictamente el régimen natural. Otra cosa es que la modificación producida sea beneficiosa o recomendable, desde un punto de vista global que considere los aspectos hidrológicos, socioeconómicos y medioambientales.

Desde el punto de vista conceptual se quiere también incidir en que la extracción mantenida en el tiempo de un determinado volumen de agua subterránea lo que produce es una situación de régimen transitorio que conduce a una nueva situación de equilibrio. El descenso de niveles producido por ese volumen mantenido puede no llegar a producir la desconexión hidráulica entre el acuífero y las corrientes superficiales, con lo que la nueva situación de equilibrio se caracterizaría por unos menores caudales base circulantes aportados por el acuífero y una reducción de la superficie de las zonas húmedas. Si el volumen mantenido de extracciones es suficientemente elevado, el descenso de niveles llega a producir la desconexión entre el acuífero y las corrientes superficiales, y por tanto la desaparición de las aportaciones subterráneas a la escorrentía.

Este concepto de situación de equilibrio tiene una gran importancia práctica a la hora de analizar el comportamiento hidrológico de la CAG, especialmente en cuanto a sus expectativas futuras. Así, de forma simplificada, para cada escenario futuro mantenido en el tiempo que se plantee en cuanto a la explotación de los acuíferos, es posible analizar la situación de equilibrio a la que conduce (dentro también de un escenario climatológico determinado). Este análisis ha de considerar el comportamiento global del sistema. Cuantitativamente, los balances hídricos que desglosan de forma detallada cada una de las entradas y salidas de agua en las MASb serán de gran ayuda para evaluar las repercusiones que las acciones antrópicas tienen en el funcionamiento del sistema. En concreto, y desde un punto de vista hidrogeológico, permitirán estimar cómo y en qué cantidad se ven afectados los diferentes términos del balance ante la explotación de los acuíferos.

### ***Estimación de balances hídricos en la cuenca alta del Guadiana***

Partiendo de los modelos numéricos realizados durante el proyecto europeo GRAPES (Acreman *et al.*,

2000; Martínez Cortina, 2001), y considerando también otros trabajos desarrollados tanto por el IGME como por otros organismos y fuentes, se han estimado recientemente (IGME, 2010) los balances hídricos detallados de cada una de las MASb de la CAG en tres situaciones distintas (Tablas 2 y 3).

Los dos primeros balances están referidos a situaciones históricas del sistema. La primera correspondería al funcionamiento del sistema en régimen natural, sin extracciones ni ningún otro efecto antrópico ejercido sobre el mismo. La segunda correspondería a la situación de equilibrio alcanzada por el sistema después de una extracción mantenida en el tiempo de unos 60 Mm<sup>3</sup>/año, que puede considerarse representativa de los años 50 del pasado siglo, anterior al gran desarrollo del regadío con aguas subterráneas. Por último, la tercera situación estimada sería la actual, con los matices que posteriormente se indicarán.

Resulta muy interesante comparar los balances hídricos en las dos primeras situaciones históricas. Esa comparación nos permite estimar la repercusión de ese primer escalón de extracciones en la disminución de las descargas a los ríos y en el descenso de la evapotranspiración, relacionado a su vez de forma bastante directa con la disminución de la superficie de las zonas húmedas.

Estos cambios se producen de forma apreciable únicamente en las masas centrales de la cuenca, en las que se concentraban prácticamente todas las extracciones. Por eso, las situaciones en régimen natural y en los años 1950s se desglosan solamente en esas masas, que son las consideradas en la Tabla 3.

Sobre estos balances hay que puntualizar que consideran la teórica división hidrogeológica, que como se indicó anteriormente no es fija, y por tanto no consideran posibles transferencias laterales con otras cuencas. Si consideramos las divisorias de cuencas existirían intercambios principalmente desde el Tajo y hacia el Júcar. Sería en este caso necesaria la mejora del conocimiento para acotar la incertidumbre existente, aunque en base a diversas estimaciones no parece que este intercambio pueda tener una incidencia significativa en los balances.

Por su parte, la Tabla 4 representa el balance hídrico del conjunto cerrado de toda la CAG, en el que las transferencias laterales entre masas quedan lógicamente anuladas entre sí.

En este balance total puede verse que la aportación de los acuíferos a la escorrentía al final de la cuenca (El Vicario) en régimen natural, venía dada principalmente por las descargas procedentes del Gigüela, del Zán cara, y del tramo Ojos del Guadiana-Tablas de Daimiel, cercanas cada una de ellas a los

Masa de aguas subterráneas (MASb)	La Obispalía			Sierra Altomira			Lillo-Quintanar			Consuegra-Villac.			Campo de Montiel							
	RN/50s		ACT.	RN/50s		ACT.	RN/50s		ACT.	RN/50s		ACT.	RN/50s		ACT.					
	E	S	E S	E	S	E S	E	S	E S	E	S	E S	E	S	E S					
<b>Términos del balance hídrico</b>																				
Recarga lluvia	15	-	15	-	80	-	80	-	80	-	28	-	28	-	35	-	132	-	132	-
Evapotranspiración	-	-	-	-	-	10	-	10	-	7	-	7	-	2	-	34	-	21	-	18
Acuifero → Río (Zancara)	-	6	-	6	-	24	-	17	-	17	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Acuifero → Río (Gigüela)	-	7	-	7	-	15	-	9	-	9	-	8	-	8	-	5	-	3	-	7
Acuifero → Río (Riansares)	-	-	-	-	-	8	-	8	-	5	-	16	-	-	-	-	-	-	-	-
Acuifero → Río (Saona)	-	-	-	-	-	3	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Acuifero → Río (Amarguillo)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	5	2	1	-	-
Acuifero → Río (Córcoles)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	3	2
Acuifero → Río (Guadiana Alto)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	53	4
Acuifero → Río (Azuer + Cañamares)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	18	-	14
Transferencia lateral (La Obispalía)	-	-	-	-	2	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Transferencia lateral (Altomira)	-	2	-	2	-	-	-	-	-	-	3	-	3	-	1	-	1	-	-	-
Transferencia lateral (Lillo-Quintanar)	-	-	-	-	-	3	-	3	-	3	-	-	-	-	2	-	-	-	-	-
Transfer. lateral (Consuegra-Villacañas)	-	-	-	-	-	1	-	1	-	1	-	3	-	-	-	-	-	-	-	-
Transfer. lateral (Mancha Occidental I)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2	-	2	-	-	-
Transfer. lateral (Mancha Occidental II)	-	-	-	-	-	15	-	15	-	17	-	-	-	-	-	-	-	37	-	43
Transferencia lateral (Rus-Valdelobos)	-	-	-	-	-	3	-	3	-	3	-	-	-	-	-	-	-	5	-	7
Extracciones (descontados retornos)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	-	-	-	-	-	-	22	-	8
<b>TOTAL</b>	15	15	15	15	82	82	82	82	82	82	31	31	35	35	44	44	48	48	137	138

Tabla 2. Balance hídrico en régimen natural y en la situación actual, correspondiente a las MASb de La Obispalía, Sierra de Altomira, Lillo-Quintanar, Consuegra-Villacañas y Campo de Montiel.  
 Table 2. Water balance in the natural regime and in the present-day situation, corresponding to the groundwater bodies of La Obispalía, Sierra de Altomira, Lillo-Quintanar, Consuegra-Villacañas and Campo de Montiel.

Masa de aguas subterráneas (MASb)	Mancha Occidental I						Mancha Occidental II						Rus-Valdelobos						
	RN		1950s		Actual		RN		1950s		Actual		RN		1950s		Actual		
	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	E	S	
<b>Términos del balance hídrico</b>																			
Recarga lluvia	70	-	70	-	70	-	108	-	108	-	108	-	32	-	32	-	32	-	32
Evapotranspiración	-	57	-	54	-	-	-	53	-	46	-	-	-	18	-	16	-	-	-
Acuífero → Río (Záncara)	-	10	-	7	-	-	5	57	41	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Acuífero → Río (Gigüela)	9	64	7	55	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Acuífero → Río (Rus)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	3	1	2	1	-	-
Acuífero → Río (de Ojos G. a Tablas D.)	-	94	-	81	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Acuífero → Río (Guadiana, tras Tablas D.)	-	5	-	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Acuífero → Río (Azuer, tras Vallehermoso)	16	1	19	1	9	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Acuífero → Río (Córcoles)	-	-	-	-	-	-	2	13	2	7	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Acuífero → Río (Guadiana, tras Montiel)	-	-	-	-	-	-	72	2	70	2	56	-	-	-	-	-	-	-	-
Transferencia lateral (Altomira)	-	-	-	-	-	-	15	-	15	-	17	-	3	-	3	-	3	-	-
Transfer. lateral (Consuegra-Villacañas)	2	-	2	-	2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Transfer. lateral (Mancha Occidental I)	-	-	-	-	-	-	-	134	-	130	-	66	-	-	-	-	-	-	-
Transfer. lateral (Mancha Occidental II)	134	-	130	-	66	-	-	-	-	-	-	-	-	20	-	19	-	-	12
Transferencia lateral (Rus-Valdelobos)	-	-	-	-	-	-	20	-	19	-	12	-	-	-	-	-	-	-	-
Transferencia lateral (Campo de Montiel)	-	-	-	-	-	-	37	-	37	-	43	-	5	-	5	-	7	-	-
<b>Extracciones (descontados retornos)</b>	-	-	-	26	-	147	-	-	-	30	-	170	-	-	-	4	-	-	31
<b>TOTAL</b>	231	231	228	228	147	147	259	259	256	256	236	236	41	41	41	41	43	43	43

Tabla 3. Balance hídrico en régimen natural, en los años 1950s y en la situación actual, correspondiente a las MASb de Mancha Occidental I, Mancha Occidental II y Rus-Valdelobos.  
 Table 3. Water balance in the natural regime, in the 1950s and in the present-day situation corresponding to the groundwater bodies of Mancha Occidental I, Mancha Occidental II and Rus-Valdelobos.

	Régim. natural		Situación 50s		Situación actual	
	ENT.	SAL.	ENT.	SAL.	ENT.	SAL.
Recarga lluvia	500	-	500	-	500	-
Evapotranspiración	-	195	-	183	-	50
Acuífero → Río (Riansares)	2	28	2	28	-	21
Acuífero → Río (Gigüela)	16	100	14	91	7	24
Acuífero → Río (Rus)	1	3	1	2	1	-
Acuífero → Río (Saona)	-	3	-	3	-	-
Acuífero → Río (Záncara)	5	97	5	78	-	23
Acuífero → Río (Amarguillo)	1	5	1	5	2	1
Acuífero → Río (Córcoles)	4	16	4	10	2	2
Acuífero → Río (Guadiana Alto, en Montiel)	3	53	3	53	4	46
Acuífero → Río (Guadiana, tras Montiel)	72	2	70	2	56	-
Acuífero → Río (de Ojos Guad. a Tablas Daimiel)	-	94	-	81	-	-
Acuífero → Río (Guadiana, tras Tablas Daimiel)	-	5	-	4	-	-
Acuífero → Río (Azuer + Cañamares, en Montiel)	-	18	-	18	-	14
Acuífero → Río (Azuer, tras Vallehermoso)	16	1	19	1	9	-
Extracciones (descontados retornos)	-	-	-	60	-	400
TOTAL	620	620	619	619	581	581

Tabla 4. Balance hídrico del conjunto de masas de la cuenca alta del Guadiana, en régimen natural, en los años 1950s y en la situación actual.

*Table 4. Water balance of the groundwater bodies of the whole upper Guadiana basin, corresponding to the natural regime, the 1950s and the present-day situation.*

100 Mm<sup>3</sup>/año. En régimen natural, esta escorrentía subterránea suponía aproximadamente el 70% de la aportación al flujo total, lo que da una idea de la gran importancia que las aguas subterráneas tienen en el funcionamiento de la cuenca. En años secos esta importancia relativa de la componente subterránea aumentaba aún más.

Como puede verse en los balances de la situación actual, la aportación del tramo Ojos del Guadiana-Tablas de Daimiel ha desaparecido totalmente, mientras que las correspondientes a los ríos Záncara y Gigüela han quedado reducidas a algunos tramos de las masas situadas al norte de la Llanura Manchega. Como además la zona central de la cuenca es, en esta situación, área de infiltración en su totalidad, los caudales en El Vicario están hoy día prácticamente reducidos a la escorrentía superficial en periodos de importantes lluvias.

Los balances deben ser interpretados con mucha cautela y sin perder de vista la realidad conceptual que representan. No hay que olvidar que tratan de representar situaciones medias no reales. Desde el punto de vista cuantitativo aportan valores que por si

solos no definen adecuadamente el comportamiento verdadero. Por ejemplo, en las relaciones acuífero-río, simplifican mediante un único *valor medio* relaciones que en muchas zonas de la cuenca cambian el comportamiento relativo (río ganador o perdedor), según la secuencia meteorológica o la época del año.

Las incertidumbres en cuanto a su aproximación a la realidad son aún mayores en el caso del tercer balance, que trata de representar la situación actual del sistema. Su estado profundamente perturbado hace aún más difícil hablar de valores medios. Siguiendo la filosofía comparativa de los dos estados anteriores se ha pretendido representar el punto de equilibrio (entendido como balances y niveles piezométricos constantes, y por tanto sin variación en el almacenamiento, equilibrando entradas y salidas) que alcanzaría el sistema si se mantuvieran en el tiempo las acciones actuales sobre el mismo (considerando unas extracciones totales en la CAG de unos 400 Mm<sup>3</sup>/año). No es una situación, por tanto, que represente a un momento concreto del sistema, pero aporta una aproximación teórica a la cuantificación actual de los balances hídricos.

### La estimación de recursos renovables en la cuenca alta del Guadiana

A partir de los balances hídricos estimados anteriormente sería sencillo determinar los recursos renovables de cada MASb, siempre y cuando el concepto que se pretende transmitir con ese término estuviera claramente establecido.

Sin embargo, tanto la definición que parece esbozar la IPH (contenida dentro de la definición de recursos disponibles) (BOE, 2008), como el concepto que parece derivarse etimológicamente del término, no parecen ser interpretables de una forma clara y única. Por ello, van a analizarse tres interpretaciones diferentes del término, que en cualquier caso pondrán en evidencia la relativa representatividad del valor estimado.

Para ello se va a considerar como ejemplo la MASb del Campo de Montiel en régimen natural. Su balance hídrico (agrupando las infiltraciones y drenajes de los diferentes ríos), sería el indicado en la Tabla 5.

*Interpretación 1:* Sería la que parece derivarse de la lectura de la IPH, y que en las tablas de balances hídricos del apartado anterior correspondería con el *Total* de las columnas de entradas. Así, el recurso renovable entendido como el total de las entradas sería de 137 Mm<sup>3</sup>/año.

Hay que hacer aquí la consideración de que los retornos, principalmente del regadío, se han englobado en los balances hídricos dentro del término de salida por bombeos, descontándolos de los mismos. La IPH los considera parte de los recursos renovables, por lo que estrictamente habría que incrementar las extracciones en una cierta cantidad y considerar ese mismo incremento como entrada por retornos. Existe mucha incertidumbre al respecto, pero los retornos

podrían estimarse en un 10% de la cifra de extracciones.

*Interpretación 2:* Otra posible interpretación sobre la estimación de los recursos renovables consistiría en detraer de la cifra de entradas totales, las salidas por evapotranspiración y las salidas laterales a otras masas (o al mar cuando fuera el caso). De esta forma, el recurso renovable se asimilaría a la descarga del acuífero en manantiales y a las corrientes superficiales en tramos de ríos ganadores, lo que supondría la aportación del acuífero a la escorrentía (escorrentía subterránea). La cifra de recursos renovables sería en este caso de 74 Mm<sup>3</sup>/año.

*Interpretación 3:* Una tercera posibilidad de interpretar los recursos renovables vendría dada por la diferencia entre la recarga procedente de la lluvia y la evapotranspiración a la atmósfera. En cierto modo, y especialmente si lo consideramos para una cuenca o subcuenca cerrada en su conjunto, es el valor que más se puede identificar etimológicamente con el concepto de recurso subterráneo renovable. Representaría, por así decirlo, el recurso neto que se renueva en la relación con la atmósfera. La infiltración de los ríos, las descargas del acuífero, o las entradas y salidas laterales constituyen procesos hidrológicos en los que el recurso procede previamente de la escorrentía superficial, de la propia recarga del acuífero, de las descargas del mismo, etc. En el caso de la CAG estos procesos son, además, especialmente relevantes, siendo habitual que lo que se drena del acuífero en una masa se infiltre en otra, y vuelva a descargarse en superficie aguas abajo.

Sin embargo, y desde un punto de vista del recurso hídrico subterráneo, ese balance neto entre la recarga de la lluvia y la evapotranspiración que se va a la atmósfera, sí que constituye *el nuevo agua* generada, que actúa de *motor* contribuyendo a desencadenar el resto de procesos que tienen lugar en el acuífero.

En valores medios a largo plazo, y con ligeras matizaciones, la recarga media procedente de la lluvia puede considerarse constante<sup>1</sup>. La evapotranspiración varía en función de la situación del sistema y supone en términos del balance una *pérdida* del recurso generado hacia la atmósfera, si bien, espe-

ENTRADAS (Mm <sup>3</sup> /año)	
Recarga lluvia	132
Infiltración ríos	5
TOTAL ENTRADAS	137
SALIDAS (Mm <sup>3</sup> /año)	
Drenaje acuífero	74
Evapotranspiración	21
Salidas laterales	42
TOTAL SALIDAS	137

Tabla 5. Balance hídrico de la masa de agua subterránea del Campo de Montiel en régimen natural.

Tabla 5. Water balance corresponding to the groundwater body of Campo de Montiel in natural regime.

<sup>1</sup> No se considera en este trabajo el posible efecto del cambio climático. A este respecto, la incertidumbre con respecto a los escenarios futuros es muy alta, especialmente en la cuenca alta, que por sus características concentra las recargas importantes en años muy húmedos. Así, una previsible distribución más extrema de la pluviometría puede incrementar los valores de dichas puntas de recarga, compensando en cierta medida la disminución de las precipitaciones. En todo caso hay que señalar que la IPH (BOE, 2008) considera para la Demarcación del Guadiana una disminución con respecto a la aportación natural del 11%, para incorporar el efecto del cambio climático.

cialmente en cuencas como la del Alto Guadiana es un indicador de la *buena salud hidrológica* de las zonas húmedas. Como se decía anteriormente esta diferencia entre recarga de la lluvia y evapotranspiración tiene aún mayor sentido de *renovabilidad* si consideramos la cuenca en su conjunto.

En este tercer caso, los recursos renovables de la masa del Campo de Montiel en régimen natural serían de 111 Mm<sup>3</sup>/año.

La utilidad conceptual de los recursos renovables, en cualquiera de las formas anteriormente definidas es muy relativa y limitada. Estas cuantificaciones que reducen los elementos del balance a un valor numérico aislado no representan cuantitativamente la evolución del comportamiento del flujo subterráneo. Pueden resultar interesantes y descriptivos en algunos casos, pero tienen el peligro de reducir a un solo número procesos más complejos. Además pueden inducir a ciertos errores de interpretación, cuando se utilizan estos valores con determinados fines, sin considerar de forma adecuada el comportamiento del sistema y lo que representan conceptualmente.

En cualquier caso, si se interpretan los recursos renovables como el conjunto de todas las entradas a las masas, en la forma que parece desprenderse de la IPH (*Interpretación 1*), los valores en régimen natural para cada una de las MASb de la CAG, serían, a tenor de las tablas de balances hídricos anteriores, y hecha la salvedad de los retornos, los indicados en la Tabla 6.

Teniendo en cuenta las consideraciones realizadas anteriormente, parece aconsejable insistir en el esca-

so significado que las cifras por si solas tienen si no se considera adecuadamente lo que las mismas representan y el funcionamiento conjunto de todo el sistema. Uno de los peligros más habituales detectado a menudo, y especialmente cuando se consideran trabajos aislados de algunos de los acuíferos, unidades hidrogeológicas o masas del sistema, es asimilar la suma de los recursos anteriores a una especie de recursos conjuntos de toda la cuenca. Es evidente que los recursos renovables de las cifras anteriores, considerados como las entradas en cada masa (*Interpretación 1*), están contabilizados varias veces en distintas masas (por ejemplo, parte de lo que entra como recarga de la lluvia en el Campo de Montiel es transferido lateralmente a Mancha Occidental II, y contabilizado como recurso renovable en ambas masas). Los reiterados procesos de descargas e infiltraciones del flujo subterráneo que tienen lugar en la CAG condicionan también estas cifras.

Si en lugar de considerar de forma independiente cada masa, consideramos el conjunto de toda la CAG, y aplicamos sobre él la definición oficial de recursos renovables entendida como en el cálculo anterior (*Interpretación 1*), puede verse que el recurso renovable en situación natural sería de 620 Mm<sup>3</sup>/año, y aún así habría que hacer las mismas consideraciones con respecto a la contabilización de recursos.

Desde este punto de vista del conjunto de la cuenca, resulta particularmente interesante analizar el balance "recarga de la lluvia menos evapotranspiración" (*Interpretación 3*), de acuerdo con lo comentado en este apartado. Puede verse que ese valor, para el conjunto de la CAG, era de unos 305 Mm<sup>3</sup>/año en régimen natural, y está en torno a los 450 Mm<sup>3</sup>/año en la situación actual. En los siguientes apartados se analizará con más detalle el significado y repercusión de este incremento.

### Consideraciones sobre la evolución futura del sistema hidrológico de la cuenca alta del Guadiana

A pesar de todos los matices e incertidumbres comentadas en los balances hídricos, de una forma global y considerando el comportamiento del sistema, existe el conocimiento suficiente para predecir la evolución hidrológica futura de los acuíferos y zonas húmedas de la CAG en función de las extracciones de agua subterránea que se realicen.

En la situación actual del sistema, el cambio en su comportamiento se refleja en los balances hídricos -a costa de un grave deterioro medioambiental- en un aspecto que de alguna manera sí supone un incremento de la renovabilidad: la reducción de la evapo-

Masas de agua subterránea (MASb)	Recurso renovable (Mm <sup>3</sup> /año)
Sierra de Altomira	82
La Obispalía	15
Lillo-Quintanar	35
Consuegra-Villacañas	44
Mancha Occidental I	231
Mancha Occidental II	259
Rus-Valdelobos	41
Campo de Montiel	137

Tabla 6. Estimación de recursos subterráneos renovables, en régimen natural, para las masas de agua subterránea de la cuenca alta del Guadiana<sup>2</sup>.

*Table 6. Estimation of renewable groundwater resources in natural regime for the groundwater bodies of the upper Guadiana basin.*

<sup>2</sup> Aunque se explica en el texto, conviene insistir en que los recursos renovables de la cuenca en su conjunto **NO** pueden obtenerse como la suma de los recursos renovables de cada masa.

transpiración en unos 125-150 Mm<sup>3</sup>/año, como consecuencia de la desaparición de zonas húmedas y áreas de descarga. Como se veía en el apartado anterior, el recurso renovable para el conjunto de la cuenca, entendido según la *Interpretación 3* (recarga de la lluvia menos evapotranspiración) habría así aumentado de 305 a 450 Mm<sup>3</sup>/año. Conceptualmente esto supone un incremento del volumen de agua que puede extraerse del acuífero manteniendo constante el nivel piezométrico en el mismo, con respecto a la situación en régimen natural; o dicho de otra manera, que una mayor parte de la recarga de la lluvia puede ser *aprovechada* por el acuífero para subir sus niveles. Este efecto sobre el balance, lejos de ser considerado como un beneficio, debe ser interpretado de forma adecuada, y valorando las intensas afecciones medioambientales que ha producido.

Los valores de los balances hídricos por masas para la situación actual se han estimado tomando como referencia un punto de equilibrio en torno a los 400 Mm<sup>3</sup>/año de extracciones en el conjunto de acuíferos de la cuenca. Mientras se mantenga esta cifra no son de esperar variaciones importantes en la profundidad de los niveles. No hay que olvidar que hablamos de situaciones *medias* que realmente no existen como tales. En términos de precipitación, y aún más de recarga, hay estadísticamente más años por debajo de la media que por encima. En este tipo de climas las puntas de recarga importantes se producen de forma generalmente puntual cada cierto tiempo. De ahí que tendencias de ligeros descensos mantenidos no siempre son evidencia de que a medio plazo los descensos continúen incrementándose.

A la vista de los balances, el *ahorro* de agua evapotranspirada provocado por la desaparición de zonas húmedas y áreas de descarga podría precisamente ser destinado a la recuperación de los niveles de los acuíferos.

Por otra parte puede estimarse (siempre suponiendo series largas en las que tengan sentido los valores medios), que en las zonas centrales de la Llanura Manchega, donde mayores descensos históricos se han registrado, y en la situación actual, se producirá una recuperación de niveles que puede estimarse en unos 8 cm/año por cada 10 Mm<sup>3</sup> (1 metro por cada 125 Mm<sup>3</sup>) que se reduzca la extracción por debajo de los 400 Mm<sup>3</sup>/año. Es decir, que una extracción global de unos 275 Mm<sup>3</sup>/año produciría en esas zonas un ascenso medio aproximado de un metro anual.

Una matización importante a considerar tiene que ver con los aspectos cualitativos a los que se refieren estas cifras. La evolución hacia la situación de equi-

lario con extracción de 400 Mm<sup>3</sup>/año se ha producido con una determinada distribución de las extracciones, en cuanto a su situación geográfica y nivel acuífero de procedencia. Las estimaciones de futuro serán más válidas en la medida que esta distribución no varíe mucho. Puede considerarse que de estos 400 Mm<sup>3</sup>/año, el 80% corresponde a extracciones para regadío en las tres masas de la Llanura Manchega (Mancha Occidental I, Mancha Occidental II y Rus-Valdelobos). Dadas las características de los acuíferos de la cuenca no son de esperar variaciones muy importantes en este sentido. Posiblemente se detecte una mayor extracción de los niveles acuíferos profundos en la zona de las masas de Mancha Occidental II y Rus-Valdelobos, con un cierto desplazamiento del centro de gravedad de las extracciones hacia dicha zona oriental de la Llanura Manchega.

Es muy importante tener en cuenta que esa situación de recuperación no es lineal e indefinida. A medida que se van recuperando los niveles el balance hídrico varía, y sólo podría llegarse al punto de equilibrio que correspondería a una situación con extracciones permanentes de 275 Mm<sup>3</sup>/año. Desde el punto de vista de relaciones acuífero-río, y especialmente del de la recuperación de zonas húmedas, no habría cambios demasiado significativos con respecto a la situación actual. En las zonas de descarga principales del sistema los niveles aún quedarían unos 10-15 metros por debajo de la superficie. Para que se volviera a producir el drenaje del acuífero en dichas zonas, al menos de una forma estacional, habría que reducir aún más esa cifra, por debajo de los 200 Mm<sup>3</sup>/año.

### **La estimación de recursos disponibles en la cuenca alta del Guadiana**

La aplicación de la definición oficial de recursos disponibles de la IPH (BOE, 2008) en la CAG, está condicionada por la situación de los acuíferos centrales de la cuenca. Según dicha definición, a los recursos renovables habría que restarles los flujos medioambientales requeridos para cumplir con el régimen de caudales ecológicos. Pero dichos flujos sólo pueden existir en la zona central de la CAG si se vuelve a producir la conexión entre acuíferos y corrientes superficiales. Obviamente, esto se produciría de forma más rápida cuanto menores sean las extracciones, y por tanto cuanto más próximos a 0 estén los recursos disponibles.

En situaciones como ésta, el cálculo de los recursos disponibles a través de la definición no parece viable sin considerar otros factores y condicionantes

en la toma de decisiones. Parece así adecuado recomendar unos valores para los recursos disponibles que tengan en cuenta la situación y el conocimiento general existente, y sin perder de vista el funcionamiento de los procesos hidrológicos anteriormente descritos y el objetivo último de recuperación hidrológica y medioambiental del sistema hídrico de la CAG.

Con estas consideraciones, la recomendación consistiría en establecer los recursos disponibles en dos fases (IGME, 2010). En una primera fase, y partiendo de la situación actual, el recurso total disponible en el conjunto de la CAG se establecería en unos 275 Mm<sup>3</sup>/año. Con esta cifra total de extracciones se producirían (como valor medio, a medio plazo) ascensos de 1 metro anual en los niveles piezométricos de las zonas en las que los descensos han sido mayores. Un reparto adecuado de estos recursos disponibles podría ser el mostrado en la Tabla 7.

Masas de agua subterránea (MASb)	Recurso disponible (Mm <sup>3</sup> /año)
Sierra de Altomira	20
Lillo-Quintanar	2
Consuegra-Villacañas	15
Mancha Occidental I	95
Mancha Occidental II	110
Rus-Valdelobos	25
Campo de Montiel	8

Tabla 7. Recomendación de recursos subterráneos disponibles para las masas de agua subterránea de la cuenca alta del Guadiana.

*Table 7. Recommended groundwater resources available for the groundwater bodies of the upper Guadiana basin.*

Sobre estas cifras podrían hacerse matices que incrementaran los recursos disponibles en algunas de las masas laterales en zonas que tuvieran escasa repercusión para la zona central de la cuenca (norte de Altomira, Lillo-Quintanar, La Obispalía). Por otra parte, la masa del Campo de Montiel, de muy distinto funcionamiento como se ha explicado, podría incrementar en secuencias húmedas este recurso disponible, aunque debería prestarse especial atención a la ubicación de las extracciones.

Con esta cuantificación de recursos disponibles se produciría una recuperación importante de niveles piezométricos, de tal modo que, por ejemplo, en los

Ojos del Guadiana, el nivel actualmente situado a unos 21 metros de profundidad (datos de campo del IGME, marzo de 2010), quedaría a unos 10 metros en un periodo de unos 15 años (suponiendo una secuencia climatológica *media*).

Sería necesaria una segunda fase aún más restrictiva en cuanto a recursos disponibles, que permitiera recuperar la conexión del acuífero con corrientes superficiales y zonas húmedas, al menos de una forma estacional, en secuencias climatológicamente húmedas. Ese valor podría estar, en principio, en torno a los 150 Mm<sup>3</sup>/año para el conjunto de la cuenca, y con los mismos matices de posibilidad de ciertos incrementos en las masas laterales.

Con respecto a los valores y consideraciones anteriores hay que hacer una serie de observaciones:

- Es importante tener claro desde el principio que para la recuperación hidrológica y medioambiental definitiva del sistema, la cifra final de extracciones mantenidas en el futuro tendrá que ser muy reducida en comparación con las actuales. Como referencias, por debajo de 200 Mm<sup>3</sup>/año se produciría previsiblemente la aportación del acuífero en algunas zonas de descarga, al menos estacionalmente en secuencias húmedas; mientras que haría falta llegar hasta unos 60 Mm<sup>3</sup>/año para mantener la situación de los años 50 del pasado siglo. En el rango comprendido entre esas cifras irían aumentando paulatinamente los caudales de descarga, las épocas en las que los ríos se comportarían como ganadores, y la superficie de las zonas húmedas. Sin embargo, si las extracciones se mantienen en los niveles inicialmente mencionados de 275 Mm<sup>3</sup>/año, el esfuerzo será inútil desde el punto de vista de recuperación de zonas húmedas, porque para los efectos de funcionamiento de las mismas es indiferente que el nivel piezométrico esté a 15 metros que a 40 metros.
- El comportamiento y evolución del sistema, en esa primera fase de reducción real de las extracciones, está claramente definido, dentro de los márgenes de incertidumbre propios de cualquier proceso hidrológico. El periodo de transición hacia esa segunda fase más ambiciosa, permitiría analizar la evolución real del sistema dentro de las particularidades del escenario que se vaya desarrollando, comprobando el cumplimiento de las tendencias esperadas. A su vez, esto permitirá acotar algunas de las incertidumbres existentes, relacionadas, por ejemplo, con la incidencia de posibles cambios relativos en la distribución geográfica de las



extracciones, aumento relativo de las extracciones procedentes del acuífero profundo, repercusión de un posible incremento de las extracciones en las zonas periféricas del sistema, mayor precisión en determinar la relación final entre las extracciones mantenidas y la recuperación alcanzada, incidencia del cambio climático, etc. De esta manera, en la segunda fase podrían tomarse decisiones más ajustadas a las necesidades del sistema.

- Es evidente que si las extracciones se reducen desde el principio aún más de las cifras indicadas, o antes se consigue pasar a esa segunda fase más restrictiva, más cerca se estará de la recuperación hídrica y medioambiental del sistema. En cualquier caso, parece *hidrológicamente justo* que en la valoración de los recursos disponibles en esta primera fase de recuperación se tenga en cuenta el incremento que ha habido en la *disponibilidad* de agua no evapotranspirada a la atmósfera como consecuencia de la situación perturbada en la que se encuentra el sistema, permitiendo que ese incremento, estimado en unos 125-150 Mm<sup>3</sup>/año, se destine precisamente a la recuperación del mismo.

## Conclusiones

La cuantificación de los recursos hídricos subterráneos de la CAG es una tarea compleja, no sólo por las dificultades e incertidumbres propias de los procesos hidrológicos a cuantificar, sino también por las especiales características y situación de la cuenca, y por la difícil aplicación conceptual de las definiciones oficiales de recursos renovables y disponibles.

A lo largo del presente artículo se han destacado algunos aspectos específicos del funcionamiento hidrológico de la CAG, especialmente relevantes a la hora de realizar e interpretar las cuantificaciones de los recursos. Entre ellos se llama la atención sobre la capacidad de autorregulación de los acuíferos en una situación no excesivamente influenciada, y en el hecho de que a cada cifra de extracciones de agua mantenida en el tiempo (y prescindiendo de la variabilidad meteorológica) le corresponde un punto de equilibrio que el sistema alcanza a medio-largo plazo, caracterizado por un cierto balance hídrico y unos determinados niveles piezométricos. Por encima de un determinado umbral de extracciones para el conjunto de la CAG (que se estima en torno a los 200 Mm<sup>3</sup>/año) las descargas de los acuíferos prácticamente no existirían en la zona central del sistema, y por

tanto no habría aportación subterránea a ríos y zonas húmedas.

Como intento de acercarse de la forma más precisa posible, desde un punto de vista hidrogeológico, a esta cuantificación, se ha estimado el balance hídrico para cada una de las MASb (considerando todas las entradas y salidas) en tres situaciones diferentes del sistema: en régimen natural, supuesto que no se ejerce ninguna acción antrópica sobre el sistema; en la situación poco influenciada que representaría la moderada extracción *histórica* realizada con norias hasta finales de los años 1950s; y por último en la situación actual, o más exactamente, en el punto de equilibrio que se alcanzaría manteniendo aproximadamente las extracciones actuales y su distribución, que representa una situación profundamente perturbada del sistema respecto a las dos anteriores.

Con respecto a la cuantificación de recursos subterráneos renovables y disponibles en los términos definidos en los documentos oficiales de Planificación Hidrológica, se realizan una serie de consideraciones al respecto de dichas definiciones y de la dificultad de su aplicación. En este sentido parece necesaria una mayor claridad en la definición de los recursos renovables, y en cualquier caso, se debe tener en cuenta el sentido conceptual de la cifra obtenida en relación a la definición que se considere.

En lo que respecta a los recursos disponibles también se han señalado limitaciones importantes en su aplicación con criterios hidrogeológicos. Su determinación difícilmente puede establecerse sin considerar factores con pesos importantes en la toma de decisiones: sociales, económicos, políticos, legales, etc. En todo caso, se propone que la estimación de los recursos subterráneos disponibles parta de un conocimiento hidrogeológico cualitativo, que considere adecuadamente los procesos hidrológicos que tienen lugar en un sistema y su evolución; y cuantitativo, representado por balances hídricos detallados y su evolución. Sólo en este marco puede darse sentido a términos que traten de cuantificar los recursos mediante valores aislados.

En la CAG se ha realizado este análisis a partir de las cuantificaciones realizadas sobre balances hídricos, y especialmente del conocimiento de los procesos hidrológicos que tienen lugar en el sistema, y de la respuesta del mismo a las diferentes situaciones en las que se encuentra en cada momento y a las acciones antrópicas que sobre él se llevan a cabo. De este modo se han evaluado las expectativas futuras de evolución de los acuíferos, ríos y zonas húmedas de la CAG.

De este análisis se derivan una serie de recomendaciones sobre los recursos disponibles, con las mati-

zaciones hechas previamente sobre la definición oficial de los mismos.

A grandes rasgos, la recomendación pasa por establecer una primera fase con unos recursos disponibles del orden de 275 Mm<sup>3</sup>/año para el conjunto de MASb de la CAG, y con una cierta distribución de los mismos. Esto llevaría a una notable recuperación de los niveles piezométricos, que tendría un límite aunque estas cifras de aprovechamiento del recurso se mantuvieran en el tiempo. Desde el punto de vista de la reaparición en determinadas zonas de las descargas naturales y de la recuperación de las zonas húmedas, esta primera fase no sería suficiente, y tendría que ir seguida de una fase posterior más restrictiva para que la recuperación hídrica y medioambiental fuera posible.

Así, se estima que por debajo de los 200 Mm<sup>3</sup>/año de extracciones mantenidas en el tiempo para el conjunto de la CAG, podrían comenzar a producirse descargas en zonas topográficamente bajas como los Ojos del Guadiana, al menos de forma estacional, en secuencias climatológicamente húmedas. A medida que esta cifra de extracciones se redujera más, aumentarían las descargas y la extensión de zonas húmedas, y el sistema sería menos sensible a la estacionalidad de dichas descargas. Pueden estimarse como referencias las cifras de 125 Mm<sup>3</sup>/año para una recuperación hídrica y medioambiental muy notable, y 60 Mm<sup>3</sup>/año para alcanzar la situación poco influenciada existente a mediados del siglo XX.

## Referencias

- Acreman, M., Almagro, J., Álvarez Rodríguez, J., Bouraqui, F., Bradford, R., Bromley, J., Croke, B., Crooks, S., Cruces, J., Dolz, J., Dunbar, M., Estrela, T., Fernández-Carrasco, P., Fornés, J., Gustard, A., Haverkamp, R., Hera, A. de la, Hernández-Mora, N., Llamas, M.R., Martínez Cortina, L., Papamastorakis, J., Ragab, R., Sánchez Juny, M., Vardavas, I. y Webb, T. 2000. Technical Report to the European Union ENV4-CT95-0186. *Groundwater and River Resources Action Programme on a European Scale (GRAPES)*. Institute of Hydrology, Wallingford, Reino Unido: 248 pp.
- BOE 2008. Orden ARM/2656/2008, de 10 de septiembre, por la que se aprueba la Instrucción de Planificación Hidrológica. *Boletín Oficial del Estado*, 22/9/2008: 38472-38582.
- CE 2000. *Directiva 2000/60/EC del Parlamento Europeo y del Consejo por la que se establece un marco comunitario de actuación en el ámbito de la política de aguas*. Comisión Europea, Luxemburgo.
- CHG 2008. *Esquema provisional de temas importantes (ETI)*. Parte española de la Demarcación Hidrográfica del Guadiana. Confederación Hidrográfica del Guadiana.
- En: Documentos del Plan, de: [<http://planhidrológico2009.chguadiana.es/>].
- CHG 2009. *Determinación de los recursos disponibles en las masas de aguas subterráneas del Alto Guadiana*. Confederación Hidrográfica del Guadiana. Documento interno provisional para PHG 2009.
- Cruces, J. y Martínez Cortina, L. 2000. *La Mancha Húmeda. Explotación intensiva de las aguas subterráneas en la cuenca alta del río Guadiana*. Papeles del Proyecto Aguas Subterráneas, Fundación Marcelino Botín, Serie A, 3, 66 pp.
- DGOH-ITGE 1988. *Estudio de delimitación de las unidades hidrogeológicas del territorio peninsular e Islas Baleares, y síntesis de sus características*. Dirección General de Obras Hidráulicas e Instituto Tecnológico GeoMinero de España. Madrid, 58 pp.
- García Rodríguez, M. y Llamas, M.R. 1992. *Aspectos hidrogeológicos en relación con la génesis y combustión espontánea de las turbas de los Ojos del Guadiana*. Actas del III Congreso Geológico de España. Salamanca, 23-26 junio, tomo 2, 285-293.
- IGME 2010. *Estimación de los recursos disponibles para cada masa de agua subterránea de la cuenca alta del Guadiana, basada en el análisis de los informes y referencias bibliográficas precedentes y en los datos de infraestructura hidrogeológica y conocimiento experto del IGME*. Encomienda de gestión para la realización de trabajos científico-técnicos de apoyo a la sostenibilidad y protección de las aguas subterráneas. Estudio complementario. Instituto Geológico y Minero de España y Dirección General del Agua. 69 pp.
- ITGE 1979. *Investigación hidrogeológica de la cuenca alta y media del Guadiana*. Informe final (Sistema 19: Sierra de Altomira, Sistema 20: Mancha de Toledo, Sistema 22: Cuenca del río Bullaque, Sistema 23: Llanura Manchega, Sistema 24: Campo de Montiel). Plan Nacional de Investigación en Aguas Subterráneas (PNIAS). Instituto Tecnológico GeoMinero de España.
- ITGE 1981. *Estudio de los recursos subterráneos de la cuenca alta del Guadiana*. Sistemas acuíferos nº 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25. Avance 1981. Instituto Tecnológico GeoMinero de España.
- Llamas, M.R., Fornés, J., Hernández-Mora, N. y Martínez Cortina, L. 2001. *Aguas subterráneas: retos y oportunidades*. Fundación Marcelino Botín y Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, 529 pp.
- Martínez Cortina, L. 2001. *Estimación de la recarga en grandes cuencas sedimentarias mediante modelos numéricos de flujo subterráneo. Aplicación a la cuenca alta del Guadiana*. Tesis Doctoral. Universidad de Cantabria, 418 pp.
- Martínez Cortina, L. 2003. Marco hidrológico de la cuenca alta del Guadiana. En: C. Coletto, L. Martínez Cortina y M.R. Llamas (eds.), *Conflictos entre el desarrollo de las aguas subterráneas y la conservación de los humedales: la cuenca alta del Guadiana*. Fundación Marcelino Botín y Ediciones Mundi-Prensa, 3-68.
- Martínez Cortina, L. 2008. *Marco hidrológico del Campo de Montiel en el contexto de un modelo de gestión participativa de una masa de aguas subterráneas*. Convenio de

- colaboración entre el IGME y la CHG. Instituto Geológico y Minero de España, 40 pp.
- Mejías, M., Losa, A. de la y Jiménez, E. 2009. *Informe sobre evolución piezométrica de la Unidad Hidrogeológica 04.04 (Mancha Occidental)*. Instituto Geológico y Minero de España, 29 pp.
- MMA-DGA 2005. *Estudio inicial para la identificación y caracterización de las masas de agua subterránea de las cuencas intercomunitarias*. Dirección General del Agua del Ministerio de Medio Ambiente. Clave 320/03.
- Montero, E. 1994. *Funcionamiento hidrogeológico del sistema de las Lagunas de Ruidera*. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid. 2 tomos. 275 pp. + anejos.
- MOPU-IGME 1988. *Estudio 07/88 de Delimitación de las Unidades Hidrogeológicas del territorio peninsular e Islas Baleares y síntesis de sus características*. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Instituto Geológico y Minero de España. Clave 21.820.035/0411.

Recibido: abril 2010  
Revisado: junio 2010  
Aceptado: junio 2010  
Publicado: enero 2011

