

Empleo de modelos de análisis global de recursos hídricos como primera actuación a emprender en propuestas de gestión que contemplen operaciones de recarga artificial de acuíferos

J. M. Murillo⁽¹⁾ y J. A. Navarro⁽²⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España c/ Ríos Rosas 23. 28003 Madrid. España.
jm.murillo@igme.es

(2) ETS Ingenieros Minas. Universidad Politécnica Madrid c/ Ríos Rosas 21. 28003 Madrid. España.
janavarro@tihsa.net

RESUMEN

En el presente artículo se aborda el estudio de la recarga artificial no como un componente aislado del resto de los elementos que constituyen un sistema de recursos hídricos, sino como un elemento más del mismo, que se encuentra interrelacionado con todos los demás, por lo que cualquier actuación que se realice sobre éstos puede afectar a la operación de recarga o viceversa. La metodología que se ha empleado a lo largo del estudio ha hecho uso de la técnica denominada análisis de sistemas. Para aplicar la misma en lo que se refiere a la evaluación de las garantías, a la disponibilidad hídrica para realizar la operación de recarga artificial y a la aptitud de los acuíferos receptores frente a la operación de recarga, que son los factores que se han analizado en el estudio, se ha aplicado el paquete informático AQUATOOL. Los resultados que se han obtenido, tras la aplicación de dicho paquete, han constatado que es recomendable abordar en primera instancia un modelo global de recursos hídricos, que contemple todos los elementos que conforman el sistema, para, en función de los resultados que se obtengan, proseguir el análisis de viabilidad de la operación de recarga artificial con la realización de un modelo numérico de parámetros distribuidos en aquellos acuíferos donde esto se estime necesario. Este modelo concretará con un mayor detalle la operación de infiltración que se propone. La construcción de una instalación piloto de recarga artificial, sobre la que se ensayen a escala reducida aspectos más específicos de dicha operación, se puede efectuar, si procede, bien anteriormente o posteriormente a la construcción del modelo de parámetros distribuidos, pero siempre ulteriormente a la realización del modelo de análisis global de recursos hídricos. En el presente artículo se expone una aplicación práctica que se ha realizado sobre el sistema de explotación Quiebrajano-Víboras. Éste se localiza en la provincia española de Jaén.

Palabras clave: gestión integral, gestión recarga artificial, recarga artificial de acuíferos y uso conjunto

Using global analysis models of water resources as an initial measure in management proposals concerning the artificial recharge of aquifers

ABSTRACT

This paper discusses artificial recharge not as an individual component disconnected from the other elements that make up a system of water resources, but as an integrated part of such a system, one that is interrelated with all the others, such that any action affecting a given element may affect the recharge operation, and vice versa. The methodology applied throughout this study is based on the technique of systems analysis, and makes use of the AQUATOOL software package with respect to assessing guarantees, water availability for the artificial recharge operation and the suitability of the host aquifer. The results obtained show that it is necessary, in the first place, to draw up a global model of water resources, incorporating all the elements that constitute the system; then, taking into account the results obtained, a viability analysis should be made of the artificial recharge operation, by means of a numerical model of the relevant parameters for the aquifer(s) in question. This model should specify in detail the infiltration operation proposed. If deemed appropriate, and either before or after drawing up the parameter model, a pilot artificial recharge plant can be constructed, so that a small-scale assay may be made of specific aspects of the artificial recharge; in any case, such a pilot plant should always be constructed after obtaining the global analysis model of water resources. The practical application described in this paper refers to the Quiebrajano-Víboras water exploitation system, which is located in the province of Jaén (Spain).

Key words: artificial aquifer recharge and conjunctive use, integrated management, managed aquifer recharge

Introducción

Las instalaciones de recarga artificial de acuíferos constituyen un elemento del sistema de recursos

hídricos al igual que los embalses, los acuíferos, los manantiales, los pozos de extracción, los canales, las conducciones, los trasvases, las estaciones de tratamiento de aguas residuales, las potabilizadoras y las

desalinizadoras. Evidentemente, su uso no tiene carácter universal, por lo que esta técnica sólo debería de aplicarse en aquellos sistemas de aprovechamiento de recursos hídricos que precisen de ella en un determinado momento. Este hecho no es ajeno a otros elementos del sistema de recursos hídricos, como son los trasvases, la reutilización, la desalación o incluso, aunque aparentemente no lo parezca, los embalses de superficie. En relación con estos últimos cabe citar el caso de algunas islas oceánicas y ciertos países del Medio Oriente, donde el sistema de recursos hídricos está constituido únicamente por acuíferos (isla de Pascua-Chile) o por acuíferos y recursos no convencionales como ocurre en Kuwait (Mukhopadhyay, et. al, 1998).

La recarga artificial de acuíferos, contemplada como un elemento constitutivo de un sistema de aprovechamiento de recursos hídricos, tiene como finalidad resolver problemas concretos, que afectan al recurso agua, en todos aquellos casos donde el análisis de sistemas decida que es la herramienta más adecuada que se puede emplear. Se entiende por este concepto (Andreu, 1993) el estudio analítico que ayuda al encargado de tomar decisiones a identificar y seleccionar una alternativa entre un gran número de ellas. Bajo esta perspectiva operacional se podría precisar que la metodología a considerar en el análisis de viabilidad de un proyecto de recarga artificial de acuíferos no tiene porqué diferir, en sus líneas básicas, de la aplicada para analizar cualquier otro elemento que se pretende integrar o cuestionar en un sistema de aprovechamiento de recursos hídricos.

A este respecto, cabe indicar, que la mejor forma de aplicar el análisis de sistemas a un entramado, más o menos complejo, de un sistema de recursos hídricos es la modelación matemática (López García, 1993). En el presente documento se emplea el término modelación matemática en vez de numérica, porque los códigos de gestión global de recursos hídricos incluyen dentro de su estructura de cálculo para simular las aguas subterráneas, las superficiales o la interrelación entre ambas, modelos que pueden admitir soluciones de tipo analítico.

La actual tecnología informática permite afrontar, sin excesivos problemas, la simulación matemática de la gestión de un sistema de embalses, tanto individualmente como conjuntamente con las aguas subterráneas y los recursos no convencionales, siempre que no se introduzcan dentro del sistema global de simulación modelos complejos para reproducir el comportamiento que caracteriza a los acuíferos, aunque existen métodos, como el de los autovalores, que pueden afrontar con ciertas limitaciones este problema (Sahuquillo, 1983). Además, es preciso advertir,

que cuando se realiza un modelo global de un sistema recursos hídricos no siempre es necesario, o viable, recurrir, para simular un acuífero o las operaciones de bombeo o recarga artificial que se realizan sobre el mismo, a modelos complejos de parámetros distribuidos. Esto se debe a que se pueden presentar problemas de no linealidad que implican, debido a la estocasticidad de las aportaciones superficiales, la necesidad de utilizar series temporales muy largas de recarga natural a los acuíferos, de descargas naturales de tipo puntual desde los acuíferos, y de intercambios no influenciados de caudal entre ríos y acuíferos (Pulido et al, 2006). Estas series son muy difíciles de obtener debido, por una parte, al enorme trabajo y tiempo que ello conlleva y, por otra, a una importante falta de datos hidrológicos, hidrogeológicos y de explotación del sistema de recursos hídricos para un tamaño de serie histórica que debería de abarcar como mínimo cincuenta años.

En este sentido cabe indicar, que el empleo de un modelo agregado, para simular el comportamiento de un elemento de tipo subterráneo en el modelo global de la gestión hídrica, cuando ello es posible, puede reproducir de forma suficientemente aproximada, en muchos casos, la transferencia de flujo entre aguas superficiales y subterráneas o viceversa (Estrela, 1992) e incluso operaciones de recarga artificial (Castaño y Murillo, 2001), lo que simplifica enormemente tanto la modelación matemática de los acuíferos que forman parte del sistema de recursos hídricos, como la global de dicho sistema. El empleo de modelos más complejos, si ello fuera necesario, podría realizarse, a escala individual, para un determinado acuífero, en otras etapas posteriores del análisis de viabilidad, que precisen contemplar aspectos de la operación de recarga artificial que requieren de una mayor precisión.

La manera en la que se ha operado en el sistema de recursos hídricos, que se presenta en este artículo, responde a la filosofía de abordar en primer lugar un modelo de gestión global de recursos hídricos, que analice la respuesta del sistema ante una o varias operaciones de recarga artificial de acuíferos que se gestionan en conjunción con todos los elementos que conforman el mismo.

El sistema de recursos hídricos del Quiebrajano-Víbras

El sistema de recursos hídricos del Quiebrajano-Víbras, que se localiza en España en la provincia de Jaén (Figura 1), lo conforman las cuencas de los ríos Quiebrajano y Víbras, que tienen una aportación en

régimen natural respectivamente de $56,77 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ y $47,84 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$. En cada uno de estos ríos se ha construido un embalse que ha recibido el mismo nombre (Quiebrajano y Víboras) que el río que regulan (Figura 2). Dichos embalses tienen una capacidad máxima respectivamente de $31,6 \times 10^6 \text{ m}^3$ y $24 \times 10^6 \text{ m}^3$. El primero de ellos recibe una aportación media anual de $15,66 \times 10^6 \text{ m}^3$ (de esta cantidad el 79% corresponde a escorrentía superficial y el 21% a escorrentía subterránea) y el segundo de $44,7 \times 10^6 \text{ m}^3$ (de esta cantidad el 60% corresponde a escorrentía superficial y el 40% a escorrentía subterránea) (González Ramón *et al*, 2004; Murillo y Navarro, 2006).

El embalse del Quiebrajano tiene importantes filtraciones en su vaso, mientras que el embalse del Víboras se construyó sobre terrenos yesíferos, por lo que las aguas que se embalsan en el mismo se contaminan y alcanzan una conductividad de $3700 \mu\text{S}/\text{cm}$ y un contenido en sólidos totales de $2650 \text{ mg}/\text{L}$ (Rubio, 2002; González Ramón *et al*, 2002). Para poder utilizar esta agua en abastecimiento urbano se precisa desalinizarla en la potabilizadora de Martos. Esta operación se realiza en una planta de ósmosis inversa capaz de tratar $16500 \text{ m}^3/\text{d}$. La gestión del sistema se complementa con el aprovechamiento de dieciséis acuíferos (figura 2), cuyos recursos renovables medios anuales se cifran en 62 millones de metros



Figura 1 Localización del sistema de recursos hídricos Quiebrajano-Víboras que está constituido por la mancomunidad del Quiebrajano y los pueblos de la comarca de Martos.

Figure 1. Location of the Quiebrajano-Víboras water resource system.

cúbicos, aunque sólo se captan 32,5 millones de metros cúbicos (López Geta, 2002). Esta explotación se realiza de manera muy desigual, ya que se concentra mayoritariamente en ocho acuíferos (Tabla 1), que se encuentran al límite de una explotación sostenible. Estos acuíferos se explotan tanto mediante la captación directa de sus manantiales, como mediante su aprovechamiento a partir de sondeos.

El sistema también cuenta con dos plantas de aguas residuales, con tratamiento secundario, que depuran el 68% de los retornos de agua que genera el abastecimiento urbano, aunque sólo se utiliza el 21% del caudal tratado, para el riego del 33% de la superficie que se cultiva. Toda esta infraestructura tiene que satisfacer una demanda urbana de $27,11 \times 10^6$ m³/a, una agrícola de $12,49 \times 10^6$ m³/a y una ecológica de $30,79 \times 10^6$ m³/a (Murillo et al, 2005). Esta última se ha estimado mediante aplicación de la metodología IFIM (Bovee, 1982; García de Jalón, 1990) y los cálculos realizados responden al concepto de régimen de caudal ambiental variable (Baeza y Vizcaino, 2008). Aparentemente el sistema es excedentario, pero la irregularidad con la que se producen las aportaciones complica enormemente la gestión del mismo. A título de ejemplo se cita que en el embalse de Quiebrajano la aportación media para años secos es de 4 millones de metros cúbicos, para años medios de 14,5 millones de metros cúbicos y para años húmedos de 31 millones de metros cúbicos, mientras que para el embalse del Víboras estas aportaciones serían respectivamente de 18, 42 y 82 millones de metros cúbicos (Murillo y Navarro, 2006).

Historia de la problemática hídrica acaecida en el sistema Quiebrajano-Víboras

El sistema de explotación Quiebrajano-Víboras, que antes del año 2004 no existía administrativamente como tal, sufrió durante la primera mitad de la última década del siglo pasado una enorme sequía, que obligó a replantear su esquema de gestión que, hasta entonces, se fundamentaba en acciones de tipo individual y descoordinadas entre sí, que implicaban el uso exclusivo de una única fuente de agua (superficial o subterránea) para satisfacer una determinada demanda hídrica. En este esquema de aprovechamiento el agua superficial se regulaba a través del embalse de Quiebrajano y tomas directas en el cauce del río Víboras, y el agua subterránea mediante numerosos sondeos, perforados en diferentes acuíferos, que se gestionaban individualmente, o bien mediante captación directa en los manantiales que drenan los acuíferos.

Dentro del nuevo esquema de aprovechamiento que se planteó para el sistema de explotación Quiebrajano-Víboras al inicio del verano de 1995, para solventar los efectos provocados por la sequía, que afectó a la península Ibérica durante los años 1992, 1993, 1994 y 1995, se emprendieron actuaciones que abordaban la utilización en agricultura de recursos no convencionales, la construcción de un embalse de regulación en el curso del río Víboras, la ejecución de baterías de sondeos de emergencia en los acuíferos de Grajales y Gracia-Morenita, y la construcción de una instalación de recarga artificial en este último acuífero.

Asimismo se establecieron, desde el punto de vista de la gestión del agua, dos subsistemas independientes de aprovechamiento hídrico, que actualmente se denominan subsistema Quiebrajano y subsistema Víboras. El primero de ellos quedó constituido por el embalse del mismo nombre, por los acuíferos conectados con los ríos Quiebrajano y Frío que a partir de su unión reciben el nombre de río Jaén, por la ciudad de Jaén, que es la capital de la provincia, y por los pueblos de la Mancomunidad del Quiebrajano. El subsistema Víboras lo formaban el embalse del mismo nombre, los acuíferos conectados con el río Víboras y los pueblos de la Comarca de Martos (Ortuño, 2002). El anterior esquema de gestión estuvo funcionando de la manera descrita hasta los primeros meses del año 2004 en que se contempló la conexión entre las tuberías del subsistema de explotación Víboras y el subsistema de explotación Quiebrajano. Esta conexión es reversible por lo que puede aportar agua tanto del subsistema Quiebrajano al subsistema Víboras, como en sentido inverso. Todo el conjunto pasó entonces a denominarse sistema de explotación Quiebrajano-Víboras.

Todas las actuaciones reseñadas anteriormente se planificaron sin antes plantear y realizar un modelo matemático de gestión global de recursos hídricos. Por lo que respecta a la instalación de recarga artificial, que se localiza en el acuífero de Gracia-Morenita, cabe indicar que también se diseñó y construyó sin previamente analizar sobre un modelo de gestión global de recursos hídricos ni sobre un modelo numérico de flujo el posible efecto a que podía dar lugar. Una vez construida la instalación y tras efectuar un ensayo de recarga artificial con agua del río Víboras por el Instituto Tecnológico Geominero de España (ITGE) y la Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía (COPTJA), que se prolongó durante 43 días (Rubio, 2002), se realizó (Gonzalez Ramón et al, 2002) un modelo numérico de flujo que permitió simular diversos supuestos de explotación/recarga.

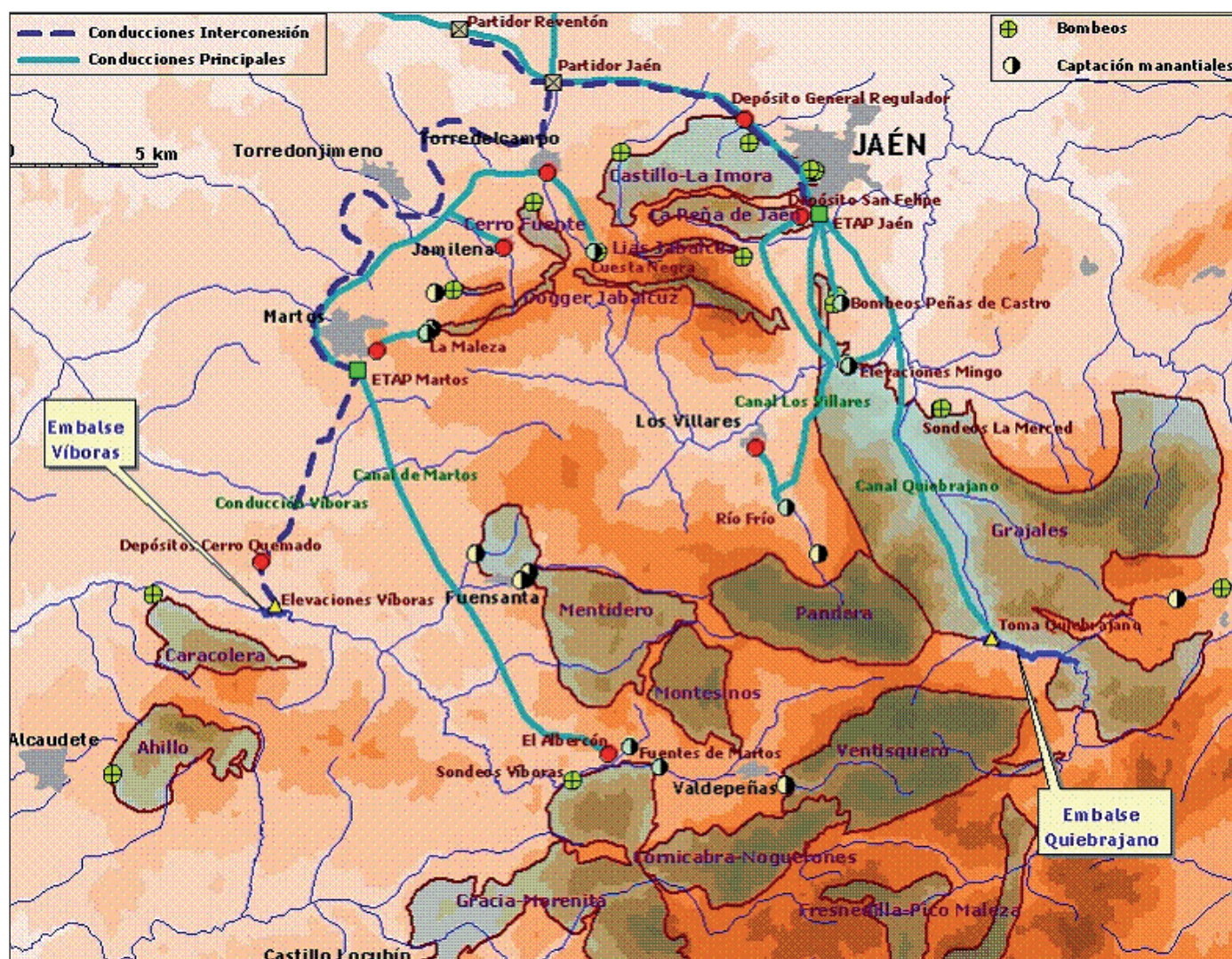


Figura 2 Infraestructuras superficiales y subterráneas de almacenamiento, captación, distribución y potabilización del sistema de explotación Quiebrajano-Víboras.

Figure 2. Surface-level and subterranean infrastructure for water extraction, storage, distribution and potability treatment for the Quiebrajano-Víboras water resource system.

Objetivo

El objetivo del estudio que se presenta en este artículo fue analizar en conjunción con el resto de los elementos que conforman el sistema de recursos hídricos Quiebrajano-Víboras la efectividad de las operaciones de recarga artificial, que hay planteadas actualmente en este sistema de explotación, así como estudiar la necesidad de programar otras operaciones, que hagan uso de esta tecnología, para contribuir a mejorar la gestión de este sistema de aprovechamiento hídrico y solucionar incipientes problemas de sobreexplotación que existen en algunos acuíferos del mismo. Fue también objetivo del estudio que las

operaciones de recarga artificial que se simularan persiguieran preferentemente fines medioambientales, tales como el mantenimiento de caudales ecológicos, la preservación de parajes de alto interés ambiental, la recuperación de niveles piezométricos y la restitución de los caudales drenados a los cursos superficiales de agua por los acuíferos.

Metodología

La cantidad en la que participa el agua superficial, subterránea o no convencional, en un proyecto donde se analiza la gestión global de un sistema de

recursos hídricos, depende del estado inicial en que se encuentra cada elemento de dicho sistema; de la cuantía, garantía y distribución temporal de la demanda que es preciso atender; y de la calidad final del agua que se requiere obtener. Por eso, la satisfacción de una demanda concreta de agua mediante el uso planeado y coordinado de recursos superficiales, subterráneos y no convencionales precisa combinar cantidades y calidades de agua de una y otra procedencia, en una proporción variable, según la época y características del ciclo hidrológico anual o hiperañual. El estado que presenta cada uno de los elementos del sistema al cabo de un cierto período de tiempo, así como la respuesta a las solicitudes a las que se le somete, se determina a través de modelos matemáticos y numéricos a veces muy complejos.

Previamente a la realización de esa etapa se definen y estudian los elementos esenciales que configuran el sistema de recursos hídricos: infraestructuras

de almacenamiento (acuíferos y embalses); usos, demandas y consumos de agua; infraestructuras de regulación, transporte, potabilización, desalación, depuración y recarga artificial. Así como los vínculos y relaciones que existen entre los distintos elementos implicados en el sistema de recursos hídrico, como son las aportaciones.

El paquete informático que se ha utilizado, para la modelación de todos los elementos que conforman el sistema hídrico, ha sido AQUATOOL, que hasta hace pocos años sólo incluía tres módulos: OPTIGES, SIMGES y AQUIVAL (Andreu y Capilla, 1993). Los dos primeros permiten realizar la optimización y simulación global de un sistema de recursos hídricos. El tercer módulo permite simular el funcionamiento de los acuíferos y la interconexión río-acuífero mediante un modelo de parámetros distribuidos y el uso de autovalores. Desde 2001 la Universidad Politécnica de Valencia ha venido trabajando en otros módulos que

UH	Acuíferos	Recarga (m ³ x 10 ⁶ /a)	Uso directo o indirecto del agua (m ³ x 10 ⁶ /a)	Usos Urbanos (m ³ x 10 ⁶ /a)	Reservas (m ³ x 10 ⁶)	Transmisividad (m ² /d)	Salinidad (µS/cm)
05.16	Lías de Jabalcuz	1,30	1,30	0,30	10	750 a 1000	300-5.370
	Dogger de Jabalcuz	1,20	1,20	1,20	54	50 a 100	
	Cerro Fuente	0,20	0,20	-	1	-	
05.17	Castillo-La Ímora	2,00	2,80	1,80	5	500 a 1000	230-2.250
	La Peña de Jaén	1,00	1,00	-	2,5	-	
05.22	Mentidero	3,00	1,73	0,66	24	-	370-810
	Montesinos	2,00	1,60	1,60	5	-	
05.28	Fresnedilla-Pico Maleza (sector Quiebrajano)	2,50	2,5	2,5	-	-	
05.66	Grajales	20,50	7,50	7,50	90	-	264-721
	Pandera	3,50	3,25	2,50		-	
	Carchel	0,50	0,15	0,15	-	200	
05.70	Cornicabra-Noguerones	3,00	0,75	0,75	8,5	-	236-1.045
	Gracia-Morenita	10,50	1,00	-	36	300-1500	
	Ventisquero	7,00	4,60	2,60	30		
Aislado	Ahillo	2,00	>2,00	0,64	-	-	
	Caracolera	1,70	0,77	0,26	-	100	370-950
Suma		61,9	32,45	22,46	> 266		

Tabla 1 Estado hidrológico y principales características hidrogeológicas y de calidad del agua contenida en los acuíferos del Sistema Quiebrajano-Víboras. El uso indirecto engloba tanto la captación de manantiales como los caudales de agua subterránea que son regulados mediante embalses de superficie, mientras que el uso directo sólo hace alusión al volumen de agua que se explota mediante bombeo. Elaborada a partir de DJ-ITGE (1997). (UH: Unidad hidrogeológica).

Table 1. Hydrologic state, main hydrogeologic characteristics and quality of the water within the water of the Quiebrajano-Víboras system. Based on data published by DJ-ITGE (1997). (UH: Hydrogeologic Unit).

fueran capaces de abordar la calidad del agua y los aspectos económicos. El resultado de estas investigaciones han sido el módulo GESCAL (Paredes et al. 2007) que modela la calidad del agua a escala de cuenca o sistema de explotación, y el módulo ECOGES (Collazos et al, 2004) que implementa aspectos económicos en la gestión de las cuencas. En el presente trabajo, dado los objetivos del mismo, únicamente se ha utilizado el módulo SIMGES.

El análisis del efecto a que pueden dar lugar las operaciones de recarga artificial, tanto en el acuífero de Gracia-Morenita como en el resto de los acuíferos que forman parte del sistema de explotación "Quiebrajano-Víboras", se ha efectuado mediante la utilización de modelos de tipo unicelular, que sólo precisan para su construcción de la serie de recarga natural para el periodo simulado y del valor del parámetro α (coeficiente de agotamiento), que se calcula analizando la curva de agotamiento de la descarga del acuífero mediante el método propuesto por Mangin (Mangin, 1982), que se fundamenta en la curva de agotamiento de Maillet.

La razón por la que todos los acuíferos vinculados al Sistema Quiebrajano-Víboras se han simulado mediante modelos unicelulares se debe al hecho de que todos responden al esquema de acuífero kárstico con descarga focalizada (Benavente et al. 1979). Esto permite que la acción elemental sea única (recarga neta), lo que simplifica mucho la modelación. Para generar las series de aportaciones en las diferentes cuencas se ha utilizado el modelo de Temez (Temez, 1977). Esta metodología, que utiliza modelos unicelulares cuando los acuíferos son kársticos, ya fue empleada (Castaño et al., 2000), proporcionando unos excelentes resultados, en el análisis de una posible operación de recarga artificial en el acuífero de Polop en la comarca de la Marina Baja de Alicante.

Una metodología algo más compleja, pero con un fundamento similar, fue la aplicada (Sanz, 1997) para estudiar el efecto de una operación de recarga artificial en el manantial de Vozmediano (Soria). Este investigador utiliza la solución de Rorabaugh (Rorabaugh, 1963) para un acuífero homogéneo unidimensional de tamaño finito, y el modelo SIMERO (Degallier, 1972), para obtener el caudal que drena el acuífero debido a una serie de recargas artificiales instantáneas uniformemente distribuidas a lo largo del acuífero o alrededor del centro de gravedad.

Análisis de resultados

Se han realizado tres simulaciones diferentes cuyos resultados se exponen a continuación. Algunas de

estas simulaciones contemplan varias alternativas de gestión.

Resultados de la modelación matemática que se ha realizado con modelos de tipo unicelular integrados en SIMGES al objeto de analizar la efectividad de posibles operaciones de recarga artificial en los acuíferos del sistema Quiebrajano-Víboras.

Una operación de recarga artificial de acuíferos precisa (Custodio y Vilaró, 1976), como condición necesaria para poder plantear la misma, que existan huecos vacíos, en el medio poroso, susceptibles de ser llenados por el agua de recarga, así como un tiempo de permanencia del agua en el acuífero que permita la posterior utilización del agua recargada, tanto en la cantidad demandada como en la calidad requerida al uso al que se destine. La mejor forma de contestar correctamente a estos interrogantes es en opinión de numerosos autores (Oaksford, 1985; Pyne, 1995; Lluria, 1996) el empleo y aplicación de modelos numéricos.

En el caso concreto del sistema Quiebrajano-Víboras cabe indicar que la implantación de operaciones de recarga artificial de acuíferos precisará de la existencia, por un lado, de recursos excedentarios que se puedan recargar, y por otro de acuíferos con una hidrodinámica que permitan una recarga eficaz en función de los objetivos perseguidos. Este último aspecto se ha analizado en el presente artículo mediante la utilización de modelos de tipo unicelular, que han proporcionado datos sobre el coeficiente de agotamiento y el periodo de semiagotamiento. Se entiende por periodo de semiagotamiento el tiempo que un acuífero tarda en reducir su caudal de descarga a la mitad desde que tiene lugar el evento de recarga. Matemáticamente se formula mediante la siguiente expresión:

$$\text{Periodo de semiagotamiento } \tau = (\ln 2)/\alpha$$

Los resultados que se han obtenido tras la aplicación de modelos unicelulares integrados en SIMGES se exponen en la Tabla 2. En la misma se observa que predominan los acuíferos que presentan un periodo de semiagotamiento de corta duración. Es decir aquellos que tras un episodio de recarga natural o artificial evacuan rápidamente el agua que ha llegado a los mismos.

Atendiendo a criterios estrictos de balance hidrológico (Tabla 1), los acuíferos del sistema Quiebrajano-Víboras, que pueden requerir actuaciones de recarga artificial, por encontrarse en situacio-

Acuíferos	Superficie Permeable (km ²)	α (mes ⁻¹)	Periodo de semiagotamiento (días)
Fresnedilla-Pico Maleza	8,35946	0,165	126,03
Pandera	18,5066	0,135	154,03
Grajales	86,27423	0,105	198,04
Carchel	4,84274	0,105	198,04
San Cristóbal	11,56748	0,135	154,03
Cornicabra-Noguerones	12,40719	0,105	198,04
Mentidero	18,88101	0,135	154,03
Montesinos	7,46544	0,075	277,26
Ventisquero	24,39392	0,081	256,72
Ahillo	9,65113	0,150	138,63
Caracolera	6,39953	0,120	173,29
Cerro Fuente	1,54999	0,255	81,55
Dogger Jabalcuz	4,63074	0,270	77,02
Lías Jabalcuz	0,74691	0,450	46,21
Castillo-La Ímora	13,57224	0,600	34,66
La Peña de Jaén	4,41846	0,750	27,73
Gracia-Morenita	30,32174	0,105	198,04

Tabla 2 Coeficiente de agotamiento y periodo de semiagotamiento en los acuíferos de Quiebrajano-Víboras.
Table 2. Exhaustion coefficient and period of semi-exhaustion in the Quiebrajano-Víboras aquifers.

nes de desequilibrio hidrológico, son Castillo-La Ímora, Ahillo, Dogger de Jabalcuz y Lías de Jabalcuz. Pero si se observa la Tabla 2 se comprueba que dichos acuíferos son los que presentan una respuesta más rápida ante cualquier evento de recarga, lo que indica una escasa capacidad de regulación, que no favorece la implantación de esquemas de recarga artificial. Este resultado era el que cabía esperar, pues se trata de acuíferos kársticos con descarga focalizada y escasa extensión superficial. Aparentemente también estarían en riesgo, según la tabla 1, los acuíferos de Fresnedilla-Pico Maleza y Pandera, pero el uso que se hace de estos embalses subterráneos responde únicamente a captación directa de sus manantiales o a una regulación de sus recursos subterráneos mediante embalses de superficie situados aguas abajo de sus descargas naturales. Es decir lo que se denomina usos indirectos.

El análisis de la disponibilidad de agua se ha realizado aplicando el modelo de Temez para el cálculo de las aportaciones en régimen natural, y la realización de encuestas para la estimación de los consumos y demandas. Los resultados obtenidos en éstas se han contrastado con la aplicación de otros métodos como lectura de contadores, teledetección, análisis de las tarifas eléctricas, etc. El conjunto de todos estos datos, unidos a las diferentes infraestructuras que

existen en el sistema, se han analizado mediante SIMGES, para diferentes hipótesis de gestión.

Los resultados que se han obtenido muestran que para el acuífero de Ahillo, que drena al río Víboras a través de diversos afluentes que desembocan aguas abajo del embalse del Víboras y de la estación de aforos E-82 (Figura 3), hay disponibilidad de recursos hídricos susceptibles de ser utilizados en operaciones de recarga artificial de acuíferos. Esto se debe a que el embalse del Víboras permanece prácticamente lleno durante toda la simulación registrando únicamente leves descensos en los periodos de máximo estiaje (Figura 4) por dos motivos:

El primero de ellos es causa directa del reducido uso que se hace del embalse del Víboras en las simulaciones realizadas, ya que éste suministra un volumen anual medio de $1,62 \times 10^6$ m³/a (con un máximo mensual de $0,341 \times 10^6$ m³/mes, lo que representa aproximadamente 208,8 l/s). Esta escasa utilización del embalse del Víboras se debe a la mala calidad que presenta el agua embalsada en el mismo y a su mayor coste unitario por el tratamiento a que tiene que ser sometida, por lo que preferentemente el sistema utiliza el agua almacenada en el embalse del Quiebrajano.

El segundo motivo, que hace que el embalse del Víboras permanezca prácticamente lleno, se debe al

importante caudal que llega al mismo por causa de la restricción ambiental que se ha establecido para la cuenca de recepción del Alto Víboras. Esto asegura una aportación muy significativa al embalse ($37,19 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ de promedio, con un mínimo anual de $6,37 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ y mensual de $0,69 \times 10^6 \text{ m}^3$).

Resulta evidente, que bajo este escenario de llenado prácticamente total del embalse del Víboras, se tendrá una función de regulación más eficaz de este embalse si existe alguna demanda a satisfacer aguas abajo del mismo, que sea complementaria al suministro de agua para abastecimiento urbano. Una de estas demandas podría ser la de satisfacer un caudal para recargar el acuífero de Ahillo al objeto de paliar

la situación de desequilibrio hidrológico que existe en el mismo. La garantía con la que se podría satisfacer este caudal de recarga es prácticamente total, puesto que el embalse del Víboras podría suministrar sin problemas del orden de $0.5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes}$.

Tras el análisis realizado cabe formular que una operación de recarga artificial en el acuífero de Ahillo no se encontrará condicionada por la disponibilidad de agua, sino por la calidad de ésta, por la relativamente baja capacidad de regulación que presenta el embalse subterráneo de Ahillo, una vez que tras una primera fase de recarga artificial el nivel piezométrico alcance la cota de los drenajes naturales del acuífero, y probablemente por el coste que implica llevar el

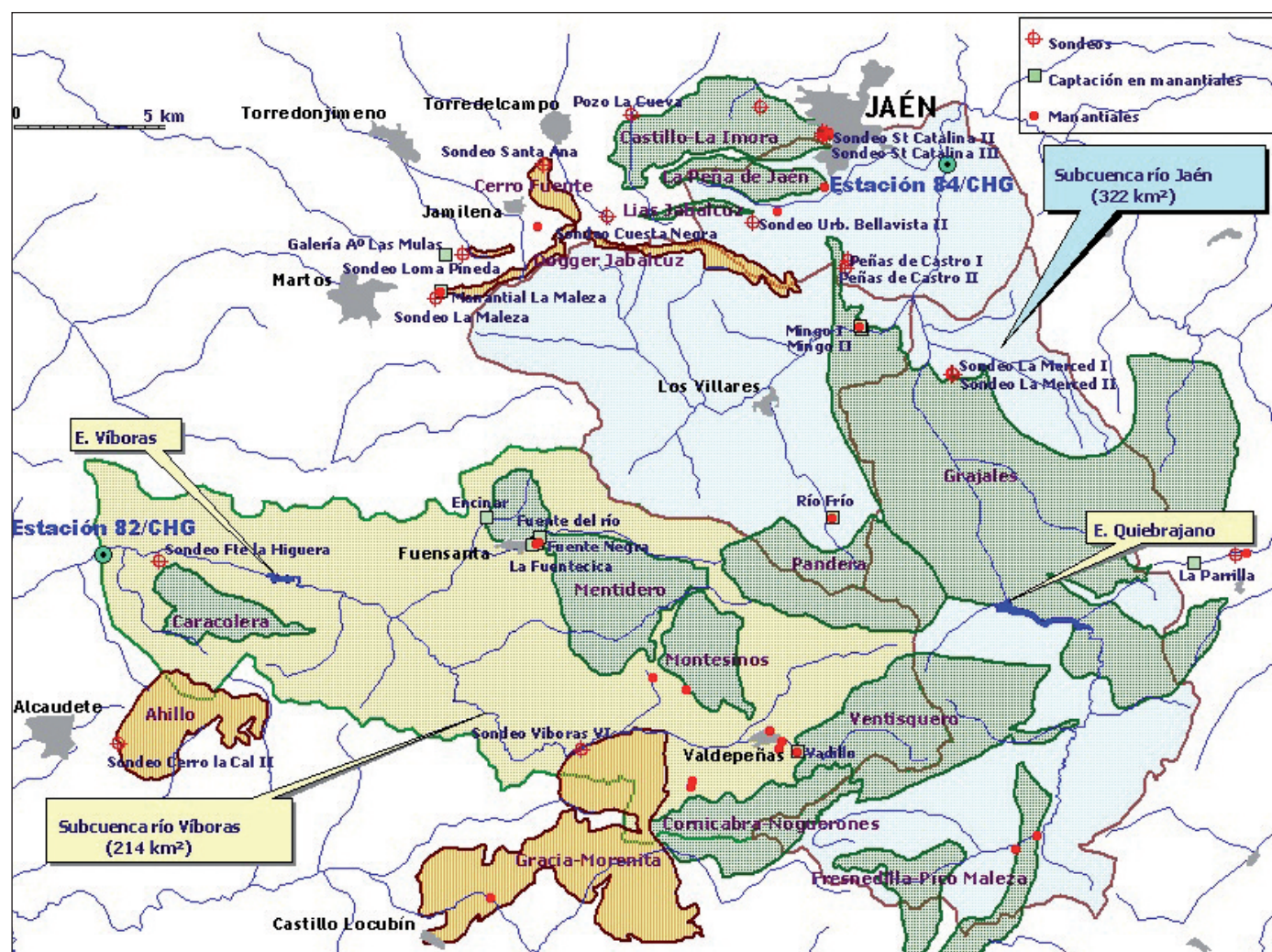


Figura 3. Subcuencas hidrográficas y acuíferos del Sistema Quiebrajano-Víboras. Infraestructuras de captación mediante sondeos y tomas en manantiales.

Figure 3. Hydrographic sub-basins and aquifers for the Quiebrajano-Víboras system. Decantation infrastructure determined by sampling from boreholes and springs.

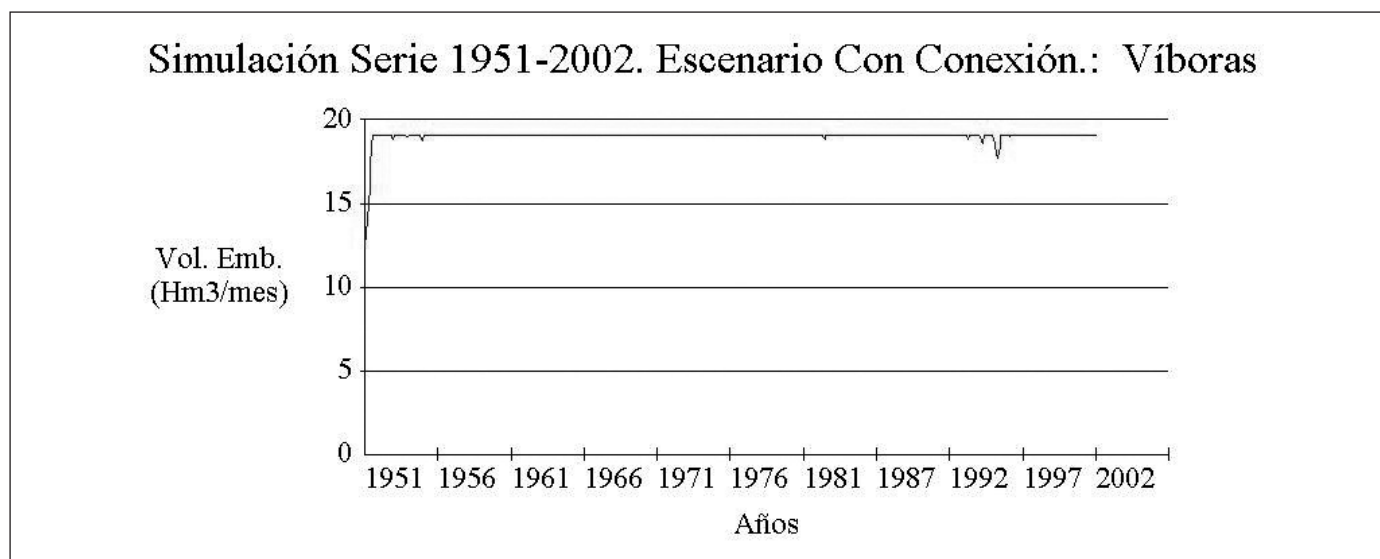


Figura 4 Volumen almacenado en el embalse Víboras. Resultado de la simulación realizada con SIMGES.

Figure 4. Volume stored in the Víboras reservoir. Results of the simulation made using SIMGES.

agua de recarga desde el embalse del Víboras hasta el punto de recarga que se establezca en el acuífero de Ahillo.

Por lo que respecta a los acuíferos de Castillo-La Ímora, Dogger de Jabalcuz y Lías de Jabalcuz cabe indicar que a la escasez de recursos excedentarios, ligados a los ríos Quiebrajano y Frío, se une una escasa capacidad de regulación y una rápida respuesta de estos acuíferos ante cualquier evento de recarga, lo que impide plantear esquemas de recarga artificial para soslayar la incipiente explotación de reservas que empieza a tener lugar en estos acuíferos. Además, al igual que en el caso del acuífero de Ahillo, el transporte del agua de recarga desde los ríos Quiebrajano y Frío hasta los puntos de recarga, que se establezcan en estos acuíferos, puede suponer un alto coste, dada la distancia y la cota que hay que salvar.

En el párrafo anterior se hace mención a una escasez de recursos hídricos, aunque aparentemente los ríos Quiebrajano y Frío son excedentarios en la estación de aforos E-84 (Figura 3), ya que la aportación media en régimen natural que se registra en dicha estación es de $56,77 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ y las demandas que hay que satisfacer en el sistema Quiebrajano-Víboras, desde los ríos Quiebrajano y Frío y acuíferos conectados con dichos ríos, es de $23,96 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ para la demanda consuntiva (abastecimiento urbano y regadío) y de $11,98$ para la demanda no consuntiva (caudales ecológicos o ambientales), por lo que existe un excedente de $20,83 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$, pero esto no es exacta-

mente así debido a que aguas abajo de la estación de aforos E-84 se riegan 18000 ha de olivar, que en parte se dotan con caudales procedentes de los ríos Quiebrajano y Frío.

Por otro lado, la aportación que circula por los ríos Quiebrajano y Frío es de carácter irregular y presenta importantes variaciones entre los años con climatología seca y húmeda, por lo que se alternan épocas de déficit con otras de grandes excedentes, lo que origina fallos en la garantía de suministro como se aprecia en la tabla 3. La aportación en el río Quiebrajano para un año húmedo es de $39,8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ y para un año seco de $10,8 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$, mientras que para el río Frío es respectivamente de $39,3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ y $18,9 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ (IGME-AAA, 2005). Los excedentes que se producen en los años húmedos podrían ser destinados a operaciones de recarga artificial en los acuíferos de Castillo-La Ímora, Dogger de Jabalcuz y Lías de Jabalcuz, pero esto no es factible porque se están construyendo una serie de balsas de regulación aguas abajo de la estación de aforos E-84, que para su óptimo funcionamiento precisan de estos excedentes.

El estudio de la potencial recuperación de los acuíferos de las unidades 05.16/Jabalcuz y 05.17/Jaén, que están sometidos a un alto grado de explotación (Tabla 1), se ha abordado mediante la realización de una simulación en la que se propone intercambiar el actual bombeo, que se realiza en los acuíferos Dogger y Lías de Jabalcuz (abastecimiento al subsistema Víboras) y Castillo-La Ímora (abastecimiento a Jaén

Criterios de Garantía		Demandas			
		Abastecimientos		Regadíos	Caudales Ecológicos
		Mancomunidad Quiebrajano	Comarca de Martos		
Garantía mensual	Nº fallos	81	84	263	104
	G _m	86,8%	86,3%	57,0%	83,0%
G _v		98,7%	94,7%	54,3%	97,1%
Máximo Déficit Mensual (hm³)	1 mes	0,417	0,433	1,908	2,033
	2 meses	0,748	0,840	3,774	3,609
Plan Hidrológico	Nº fallos	10	15	51	20
	G _{CPH}	80,4%	70,6%	0,0%	60,8%
DEF15					NO CUMPLE
DEF25		NO CUMPLE	NO CUMPLE		
DEF50				NO CUMPLE	

Tabla 3 Déficit y fallos en la garantía de suministro de los abastecimientos, regadíos y caudales ecológicos del sistema Quiebrajano-Víboras obtenidos mediante la aplicación de SIMGES para el escenario con conexión. El escenario sin conexión corresponde a la situación anterior al año 2004 y el escenario con conexión a la posterior a dicho año.

Table 3. Water deficit and failures in supply for consumption and irrigation, and in ecological yield, in the Quiebrajano-Víboras aquifers, calculated with the SIMGES program, for the connected hypothesis. The non-connected scenario corresponds to the situation prevailing before 2004, and the connected scenario refers to subsequent years.

capital), por un nuevo bombeo, que tendría lugar en el acuífero Gracia-Morenita. En la tabla 4 se observa el resultado de esta simulación, que proporciona unos índices de garantía para los caudales ecológicos que son idénticos en ambas situaciones. Por lo que respecta al abastecimiento urbano se obtienen unos

índices de garantía muy parejos, aunque ligeramente superiores para la hipótesis en que se bombea en los acuíferos de Jabalcuz y Castillo-La Ímora.

Este resultado no se debe a una falta de recursos en el acuífero de Gracia-Morenita, sino a una falta de capacidad en la potabilizadora de Martos, pues en la

Criterios de Garantía		Demandas					
		Abastecimientos				Caudales Ecológicos	
		Mancomunidad Quiebrajano		Comarca de Martos			
		(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
Garantía mensual	Nº fallos	81	86	84	99	104	104
	G _m	86,8%	85,9%	86,3%	83,8%	83,0%	83,0%
G _v		98,7%	98,2%	94,7%	93,1%	97,1%	97,1%
Máximo Déficit Mensual (hm³)	1 mes	0,417	0,521	0,433	0,455	2,033	2,033
	2 meses	0,748	0,965	0,840	0,896	3,609	3,609
Plan Hidrológico	Nº fallos	10	10	15	19	20	20
	G _{CPH}	80,4%	80,4%	70,6%	62,7%	60,8%	60,8%
(1)	Simulación CON sondeos Jabalcuz y Castillo-La Ímora						
(2)	Simulación SIN sondeos Jabalcuz y Castillo-La Ímora						

Tabla 4 Resultados de las simulaciones en la que se propone intercambiar el actual bombeo, que se realiza en los acuíferos Dogger y Lías de Jabalcuz (abastecimiento al subsistema Víboras) y Castillo-La Ímora (abastecimiento a Jaén capital), por un nuevo bombeo que tendría lugar en el acuífero Gracia-Morenita.

Table 4. Results from simulations under the assumption of replacing the current pumping system, from the Dogger and Lías de Jabalcuz aquifers (supplying the Víboras subsystem) and from the Castillo-La Ímora aquifer (supplying the city of Jaén), with a new pumping system based on the Gracia-Morenita aquifer.

segunda hipótesis que se plantea (bombeos en Gracia-Morenita) se precisa tratar en dicha planta un caudal que no puede asumir la misma por falta de capacidad. Una vez que se subsane esto se podrá suministrar un mayor caudal desde el acuífero de Gracia-Morenita, lo que dará lugar a una garantía para abastecimiento urbano mayor que la obtenida en la primera hipótesis (bombeos en Jabalcuz y Castillo-La Ímora), que permitirá asegurar los caudales ecológicos con un alto grado de satisfacción y proceder a la recuperación de los acuíferos sobreexplotados, o próximos a este estado.

Por último indicar que los acuíferos que presentan mejores características hidrodinámicas, junto al acuífero de Gracia-Morenita, para realizar operaciones de recarga artificial de acuíferos son los de Grajales, Carchel, Cornicabra-Noguerones, Montesinos y Ventisqueros, que son precisamente los que presentan mayores recursos excedentarios y un mejor estado de regulación (Tabla 1). Por lo que desde el punto de vista de su actual explotación no precisan de operaciones de recarga artificial de acuíferos.

Descripción de las instalaciones y operaciones de recarga artificial llevadas a cabo en el acuífero Gracia-Morenita. Resultados obtenidos tras la aplicación de SIMGES al sistema Quiebrajano-Víboras al objeto de analizar la repercusión de posible operaciones de recarga artificial en dicho acuífero sobre determinados elementos del sistema de recursos hídricos.

Los resultados expuestos en el apartado anterior únicamente hacen referencia, por lo que respecta al acuífero de Gracia-Morenita, al comportamiento o aptitud que presenta un acuífero ante una operación de recarga artificial a partir de su coeficiente de agotamiento y del periodo de semiagotamiento. En el presente apartado se analiza más profundamente dicha aptitud mediante la simulación con SIMGES de diferentes escenarios o alternativas de gestión.

Se ha comentado con anterioridad que, previamente a la realización del modelo global de recursos hídricos cuyos resultados se analizan en el presente artículo, se construyó una instalación de recarga artificial en el acuífero de Gracia-Morenita. Esta instalación se diseñó inicialmente con fines no experimentales ni de investigación, por lo que su objetivo era exclusivamente de producción.

La instalación se construyó (COPTJA-ITGE, 1996) durante la sequía de 1995 a la par que los sondeos de emergencia (Molina et al., 1996), que se perforaron en el acuífero de Gracia-Morenita para apoyar al abaste-

cimiento del subsistema Víboras. El plan operacional que se diseñó para gestionar la recarga artificial se realizó pensando que los sondeos perforados en el acuífero de Gracia-Morenita, que se conocen con el nombre de sondeos del Víboras, se iban a utilizar siempre a partir de ese momento, y no sólo para solventar únicamente la situación de extrema sequía acaecida en el año 1995, que es lo ocurrido hasta la fecha. El esquema de funcionamiento que se planteó en dicha instalación respondía al clásico objetivo de paliar, mediante recarga de los excedentes que tuvieran lugar en años húmedos o en los periodos invernales en el río Víboras, el efecto de los bombeos que se realizaran en el acuífero de Gracia-Morenita en las épocas estivales o en los periodos de sequía.

La instalación de recarga artificial construida en el acuífero de Gracia-Morenita consta de dos sondeos (Víboras II y Víboras V), que permiten introducir por gravedad agua en el acuífero. El agua de recarga se capta mediante una toma superficial en el arroyo El Papel, que es un afluente del río Víboras. Desde esa toma se conduce el agua a un dispositivo de decantación y sedimentación para disminuir el contenido de sólidos en suspensión. Después de este tratamiento se introduce el agua por gravedad en los sondeos de recarga. El sistema se ha dimensionado para recargar artificialmente en el acuífero Gracia-Morenita un caudal máximo de $0,21 \times 10^6 \text{ m}^3$ por mes (80 l/s) (ITGE-COPTJA, 2000). La cifra reseñada anteriormente responde a cálculos de índole puntual (aforos en el río Víboras en su entrada al acuífero de Gracia Morenita) y no están fundamentadas en un análisis global del sistema que implique a todos los elementos que forman parte del mismo.

A juicio de los autores del presente artículo, que han visitado la instalación de recarga artificial, se estima que el dispositivo de decantación y sedimentación no parece adecuado a las especificaciones de materia en suspensión que puede admitir un sondeo de recarga artificial. Éstas se concretan en un excelente trabajo realizado por la Universidad Politécnica de Barcelona que las fija como máximo en 1mg/L de materia en suspensión (Perez-Paricio y Carrera, 1999), independientemente de su mineralogía. Sobre este último aspecto los autores del presente artículo tienen importantes y considerables dudas. Por otro lado, dado que se trata de un acuífero calcáreo, con un cierto grado de kartificación, la admisión de materia en suspensión podría ser notablemente mayor que el valor anteriormente reseñado, aunque no cuantificable hasta que no se realicen ensayos "in situ".

Otros factores, ligados también a los procesos de colmatación, sobre los que tampoco se ha encontra-

do información en la bibliografía consultada sobre el diseño de la instalación de recarga artificial, hacen referencia a la previsible evolución y disminución de la tasa de admisión de agua por efecto de la colmatación que se vaya generando tanto en el acuífero como en el filtro de los sondeos. Asimismo no se ha encontrado referencia alguna sobre análisis de la calidad física y química del agua de recarga que relacione las variaciones del caudal, que circula por el cauce del arroyo de El Papel, con la tipología y cantidad de materia en suspensión que lleva el agua de recarga, así como con su quimismo. Todos los temas enunciados anteriormente tienen una notable importancia en el óptimo diseño del dispositivo de sedimentación y decantación de una instalación de recarga artificial.

Hasta la fecha se ha efectuado una única prueba de recarga que ha tenido lugar sobre el sondeo denominado Víboras II. Los resultados que se han obtenido (Rubio, 2002) han puesto de manifiesto una capacidad máxima de admisión de agua de 20 a 25 l/s, aunque el caudal medio recargado ha sido de 19 l/s. La prueba de recarga tuvo una duración, como se ha mencionado anteriormente, de 43 días, con una única incidencia reseñable, que fue la detección de un ligero aumento en el caudal drenado por el manantial que da origen al río San Juan, a partir del día 24 de iniciada la misma. Este hecho en opinión de los autores del presente artículo podría ser un indicio de una rápida circulación del flujo subterráneo, que puede limitar la efectividad de la operación de recarga artificial. En el sondeo Víboras V únicamente se realizaron ensayos de bombeo de larga duración, que permitieron estimar una capacidad de recarga en torno a los 60-65 l/s, por lo que la capacidad de recarga artificial de los dos sondeos que constituyen la instalación se evaluó en 80 l/s (ITGE-COPTJA. 2000).

El modelo numérico de parámetros distribuidos (se aplicó el código Modflow en su versión Visual Modflow) que se realizó en este acuífero, para evaluar la efectividad de la experiencia de recarga artificial, puso de manifiesto (Gonzalez Ramón et al, 2002), ante periodos de bombeo de 100 l/s y operaciones de recarga artificial de 50 l/s, que se realizaría en aquellos meses en los que no es necesario bombear el acuífero, que los bombeos, por si solos, provocan un descenso en la aportación drenada por acuífero del 28%, mientras que la combinación de bombeo y recarga artificial implica una disminución del volumen de agua descargado por el acuífero de tan sólo el 2,3%. El caudal de recarga reseñado anteriormente es inferior al máximo caudal de diseño ($0,21 \times 10^6 \text{ m}^3$ por mes) de la instalación (ITGE-COPTJA. 2000).

A partir de los valores de transmisividad ($300 \text{ m}^2/\text{d}$ en los sectores confinados y $1500 \text{ m}^2/\text{d}$ en los libres)

y almacenamiento ($3,3$ a $4,2 \times 10^{-5}$ en el sector confinado y $1,5 \times 10^{-2}$ en el libre) determinados (González Ramón, 2001) a través de ensayos de bombeo en los sondeos realizados en 1995, los autores del presente artículo han calculado una velocidad real de circulación del agua subterránea de 6 m/d , que ofrece, para la operación de recarga artificial planteada, unas características hidrodinámicas mejores que las proporcionadas por el coeficiente de agotamiento ($0,0035 \text{ días}^{-1}$) y el periodo de semiagotamiento (198 días) que se muestran en la tabla 1. No obstante es preciso advertir que los valores de transmisividad y almacenamiento a los que se hace referencia son puntuales y corresponden a zonas especialmente favorables para la captación de agua, por lo que pueden no ser representativos de todo el acuífero, dada la elevada anisotropía y heterogeneidad que suele caracterizar a los acuíferos calcáreos. En cambio el coeficiente de agotamiento se estima en función del análisis del hidrograma de una descarga puntual, por lo que puede resultar más representativo del comportamiento hidrodinámico de un determinado acuífero.

En relación con lo anterior cabe indicar que la evaluación de la efectividad de una operación de recarga artificial a través únicamente de los resultados que ofrece un modelo numérico de flujo subterráneo puede dar lugar a importantes incertidumbres, que se pueden deber tanto al efecto de escala, entendiendo como tal el hecho de que la conductividad hidráulica media en un modelo es superior a la media de las conductividades hidráulicas obtenidas en ensayos de campo a escala local (Samper y García Vera, 1998), como al posible empleo en la calibración del modelo numérico de una combinación lineal del campo de conductividad hidráulica que proporcione una solución de la ecuación de flujo matemáticamente igual de válida. Esto se traduce en la estimación de una velocidad de circulación del flujo subterráneo que puede ser considerablemente mayor o menor que la real. Por esta razón, los resultados que se obtienen utilizando modelación numérica deben contrastarse con medidas obtenidas "in situ", bien mediante el empleo de trazadores, o bien mediante otras determinaciones realizadas a través de la utilización de una instalación experimental de recarga artificial que permitan obtener un campo de velocidades. Como ejemplo de la primera propuesta se citan los estudios (Murillo y del Pozo, 1991) realizados en el río Oja (La Rioja-España) y de la segunda la investigación efectuada (Murillo et al, 1994) en la instalación de recarga artificial de Guadajoz sita en el aluvial del río Guadalquivir (Sevilla-España).

Una vez realizadas las anteriores puntualizaciones

Situación		Simulación de la descarga del acuífero Gracia-Morenita en el nacimiento del río San Juan							GARANTÍA VOLUMÉTRICA (Gv)		
		Valor Medio (m³x10⁶)	Máximo Anual (m³x10⁶)	Mínimo Anual (m³x10⁶)	Máximo Mensual		Mínimo Mensual				
					10º m³	l/s	10º m³	l/s	Caudal ecológico Víboras	Caudal ecológico San Juan	Uso urbano Martos
Sin bombeos		11,212	20,500	5,000	2,40	926	0,30	116	89,3%	99,4%	98,1%
Régimen Influenciado	Con Bombeos	10,204	20,500	4,300	2,40	926	0,30	116	96,0%	97,2%	98,0%
	Con Bombeos y Recarga Artificial	11,076	21,800	4,300	2,50	965	0,30	116	96,0%	97,5%	98,0%
Cuantificación de los Bombeos y la Recarga Artificial simulada											
Bombeos sondeos Víboras		1,012	3,600	0,000	0,300	116	0,00	0			
Recarga Artificial acuífero Gracia-Morenita		0,859	1,400	0,000	0,200	77	0,00	0			

Tabla 5 Resultado del efecto combinado de un bombeo y una recarga artificial en el acuífero de Gracia-Morenita. Análisis de garantías.
Table 5. Results of the combined effect of pumping and artificial recharge with the Gracia-Morenita aquifer. Analysis of water supply guarantees.

cabe formular que la viabilidad de la recarga artificial, que se planteó realizar en el acuífero Gracia-Morenita en el año 1995 con recursos superficiales de la cabecera del río Víboras, puede en la actualidad encontrarse ligada a un objetivo de compensación relacionado con la disminución de caudal que puede experimentar su principal descarga natural, que es el Nacimiento del río San Juan, por causa de los bombeos que cabe realizar en el acuífero Gracia-Morenita para mejorar el abastecimiento del Sistema Quiebrajano-Víboras. Ésta es una alternativa que se viene barajando desde hace tiempo por diferentes Organismos de la Administración Hidráulica española tanto de índole estatal como local (Rubio, 2002). El río San Juan configura una cuenca hidrográfica diferente a la que conforma el sistema Quiebrajano-Víboras, además, su nacimiento constituye un punto de singular importancia ambiental y de aprovechamiento para abastecimiento urbano y agricultura, por lo que cualquier actuación que afecte al mismo puede tener una repercusión sobre intereses ajenos a la buena gestión del sistema Quiebrajano-Víboras, por lo que la realización de una operación de recarga artificial podría minimizar cualquier posible afección.

El efecto combinado, que puede provocar en el acuífero de Gracia-Morenita un bombeo a través de los sondeos del Víboras y una operación de recarga artificial de un volumen de agua comprendido entre 0 y $1,40 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$, se ha analizado mediante el código SIMGES a través de dos supuestos. La distribución mensual con la que se ha simulado dicha recarga ha

sido la siguiente: nula entre los meses de junio y octubre, y máxima de $0,20 \times 10^6 \text{ m}^3$ por mes entre noviembre y mayo. Los resultados que se han obtenido para los dos supuestos simulados son los siguientes:

- En el caso de que no se capten recursos subterráneos del acuífero Gracia-Morenita mediante los sondeos del Víboras (el acuífero funciona en régimen natural) se obtienen unos indicadores de garantía muy satisfactorios para el caudal ecológico en el nacimiento del río San Juan y para el abastecimiento de los núcleos urbanos de la cuenca del río Víboras (Tabla 5). Sin embargo, el caudal ecológico en la cabecera del río Víboras presenta unos indicadores de garantía insuficientes (garantía volumétrica del 89,3%), ya que todo el caudal que se destina al abastecimiento de los núcleos urbanos de la cuenca del Víboras se capta directamente de los manantiales que hay en esta zona, por lo que se detrae un importante caudal al río Víboras y a sus afluentes, que repercute en el caudal que circula aguas abajo de los puntos de toma y captación.
- En el caso de que se capten recursos subterráneos en el acuífero Gracia-Morenita, mediante los sondeos del Víboras (caudal promedio anual de $1,012 \times 10^6 \text{ m}^3$ y máximo de $3,6 \times 10^6 \text{ m}^3$) y se recargue artificialmente el acuífero con excedentes de la cabecera de la cuenca del río Víboras (caudal promedio anual para el periodo estudiado de $0,859 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ y máximo de $1,4 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$), la garantía de

satisfacción del caudal ecológico en la cuenca del alto Vóboras mejora respecto a la situación anteriormente analizada (Tabla 5), ya que se libera parte de los recursos que se captaban directamente para abastecimiento urbano en los manantiales que drenan los acuíferos de Montesinos, Ventisquero y Cornicabra-Noguerones. La descarga de estos acuíferos constituye el caudal de base de la escorrentía de la cuenca de la cabecera del río Vóboras y, por tanto, el sustento hidrológico de los caudales ecológico que han de circular por los distintos cauces de la cuenca alta del río Vóboras.

En contrapartida se produce, por causa del bombeo que se realiza en el acuífero de Gracia-Morenita, una merma en el índice de garantía del caudal ecológico en el Nacimiento del río San Juan (la garantía volumétrica pasa del 99,4 % en régimen natural al 97,2% en régimen influenciado), sin que esto suponga una mejora en el abastecimiento a las poblaciones del río Vóboras (Tabla 5), ya que lo único que se hace es sustituir una fuente de suministro por otra. Antes el abastecimiento se realizaba exclusivamente a partir de aguas captada directamente en manantiales y ahora esta fuente se complementa con un bombeo en el acuífero de Gracia-Morenita a través de los sondeos del Vóboras. No obstante desde el punto de vista del mantenimiento de los caudales ecológicos se pre-

senta una situación con unos índices de garantía más equilibrados entre sí (96% y 97,5 % frente a 89,3% y 99,4%).

Los resultados que proporciona la simulación de la operaciones de recarga artificial (Tabla 5), que se plantean en el acuífero de Gracia-Morenita, en las condiciones implementadas, no muestran un efecto significativo en términos de garantía, ya que, aunque la recarga artificial permite que el caudal de descarga del acuífero en régimen influenciado, que es de $11,076 \times 10^6 \text{ m}^3$, se aproxime al promedio anual que tiene lugar en régimen natural ($11,212 \times 10^6 \text{ m}^3$), este incremento puede no justificar los costes que implica una operación de recarga artificial.

Es importante precisar que la gestión del sistema y más concretamente la del acuífero de Gracia-Morenita no debe pretender que el manantial que da origen al nacimiento del río San Juan drene el mismo volumen de agua en régimen natural que en régimen influenciado, sino que este drenaje se produzca con una cadencia similar a como lo hace en régimen natural, y en una cuantía que respete el régimen de caudales ambientales determinado a través de la metodología IFIM.

En la Figura 5 se muestra la evolución de la descarga anual del acuífero de Gracia-Morenita para distintas hipótesis de aprovechamiento del acuífero. En

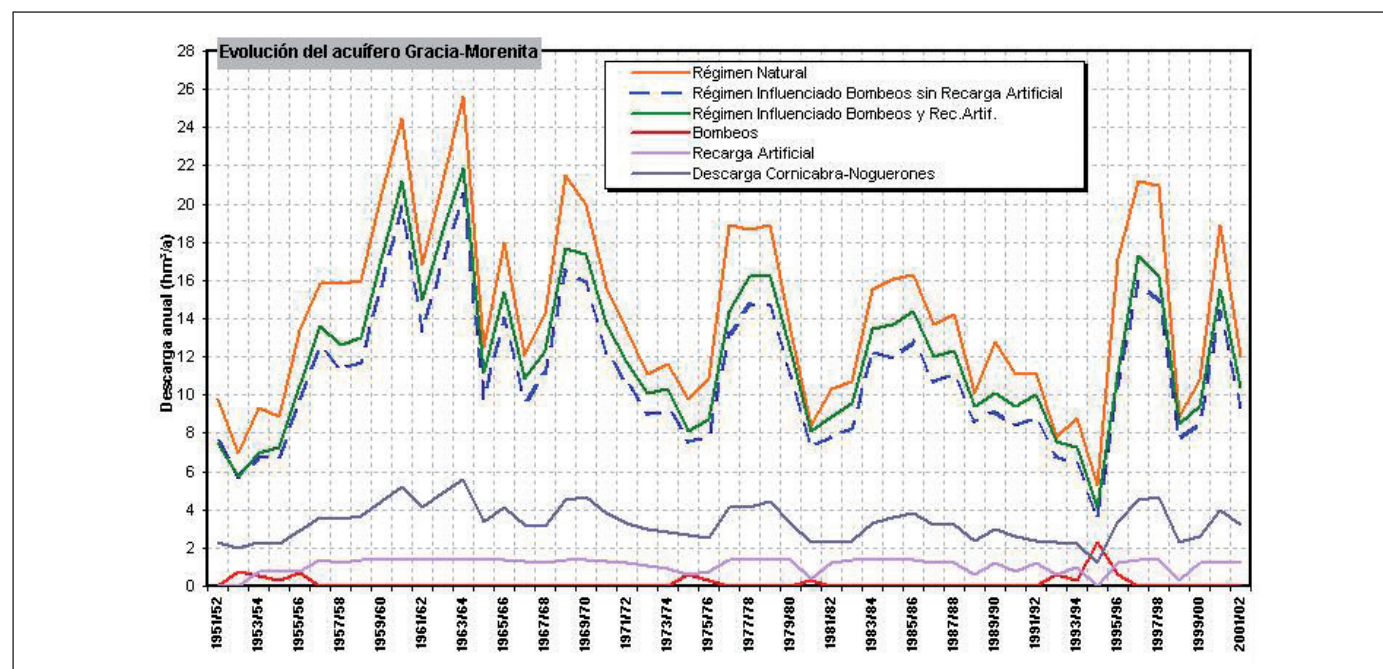


Figura 5 Evolución del volumen almacenado en el acuífero de Gracia-Morenita para una simulación realizada con el código SIMGES en la que tiene lugar bombeo y recarga artificial.

Figure 5. Evolution of the volume of water stored in the Gracia-Morenita aquifer for a simulation carried out using the SIMGES code, including pumping and artificial recharge.

la misma se observa que el régimen de descarga del manantial que da origen al nacimiento del río San Juan se altera por el efecto combinado de la acción recarga artificial-bombeo. En general se observa que en los ciclos en los que se bombea la descarga por el manantial del río San Juan es mayor en régimen natural que en régimen influenciado (bombeo y recarga artificial). En cambio, en aquellos ciclos en los que no se bombea ocurre lo contrario, lo que demuestra la escasa capacidad de regulación que tiene el acuífero de Gracia-Morenita para un ciclo hiperanual. Para los valores extremos la tabla 5 muestra que la descarga máxima mensual en régimen influenciado con recarga artificial es mayor ($2.50 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes}$ que equivale a 965 L/s) que la que se produce en régimen natural ($2.40 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{mes}$ que equivale a 926 L/s), aunque el mínimo mensual es el mismo para las dos situaciones, no así el anual donde en régimen natural se descargan $5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$ y en régimen influenciado $4,3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{a}$.

Además, en los periodos de intensa sequía (Figura 6), como el acaecido entre el año 1993 y 1995, que es cuando más se necesitará bombear en los sondeos del Víboras para garantizar el abastecimiento de las poblaciones de la cuenca del río Víboras (hasta $3,6 \times$

$10^6 \text{ m}^3/\text{a}$), la recarga artificial no resulta efectiva, produciéndose el consiguiente vaciado del embalse subterráneo, aunque el acuífero se recupera rápidamente en cuanto tiene lugar un evento climático de tipo húmedo, como el acaecido en el año 1996 y 1997. El vaciado que se produce en el acuífero, si se contemplan operaciones de recarga artificial, es como máximo de $0,22 \times 10^6 \text{ m}^3$ por mes, mientras que si no se considera recarga artificial dicho vaciado es como máximo de $0,26 \times 10^6 \text{ m}^3$ por mes.

La escasa efectividad de la recarga artificial, en términos de garantía, se debe a la baja capacidad de regulación del acuífero calizo-dolomítico, que constituye el embalse subterráneo de Gracia-Morenita. De hecho se han realizado simulaciones aumentando la capacidad de recarga a $0,42 \times 10^6 \text{ m}^3$ por mes (160 L/s) y tampoco se obtiene resultados significativos (Tabla 6). En dicha tabla se puede observar que, tanto si el caudal de recarga es de 80 L/s como de 160 L/s, la garantía mensual y volumétrica para el abastecimiento a la comarca de Martos y para los caudales ecológicos en los ríos Víboras y San Juan es la misma. Probablemente, si el grado de explotación del sistema Quiebrajano-Víboras fuera notablemente mayor, es casi seguro que la recarga artificial aportaría un

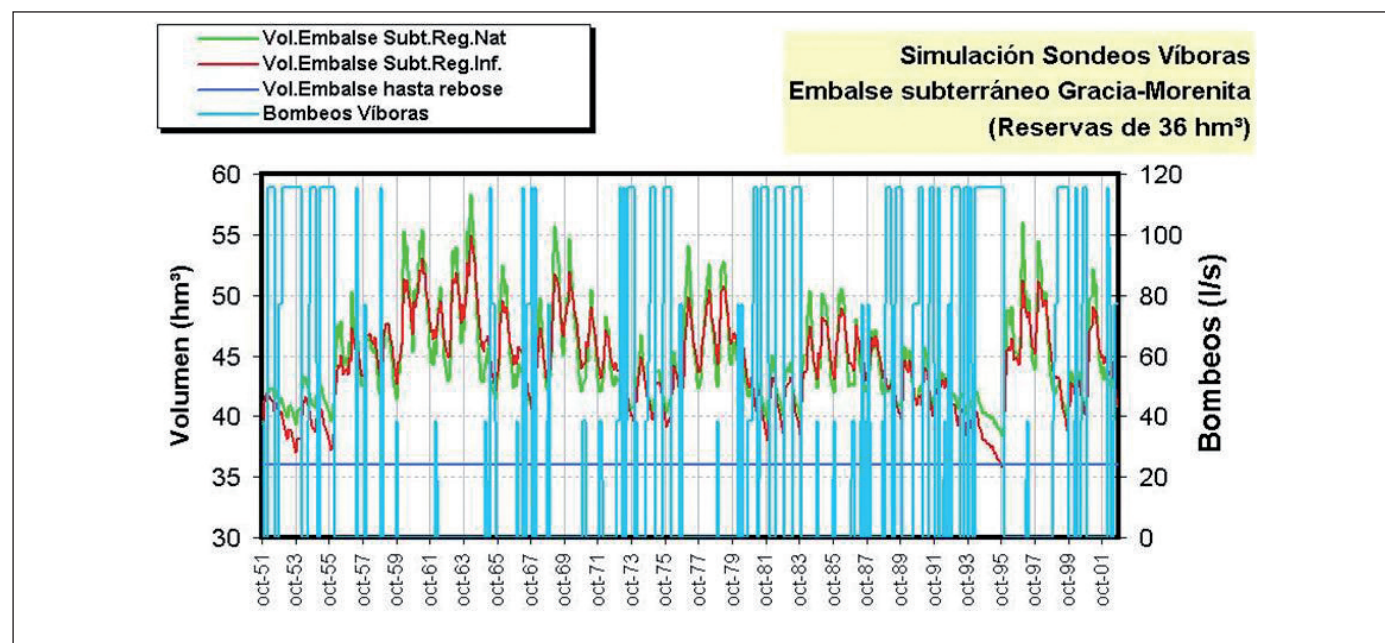


Figura 6 Evolución de la descarga anual del acuífero de Gracia-Morenita para distintas hipótesis de aprovechamiento del acuífero. Vol.Embalse Subt. Reg.Nat = Evolución del volumen embalsado en el acuífero cuando el régimen de funcionamiento es el natural; Vol.Embalse Subt. Reg.Inf. = Evolución del volumen embalsado en el acuífero cuando el régimen de funcionamiento se encuentra influenciado por bombeo; Vol.Embalse hasta rebose = Volumen de reservas que contiene el embalse subterráneo; Bombeos Víboras = Bombeos realizados en los sondeos del Víboras.

Figure 6. Evolution of the annual discharge from the Gracia-Morenita aquifer for diverse hypotheses of aquifer exploitation.

SIMULACIÓN ESCENARIO CON CONEXIÓN ALTERNATIVA SONDEOS VÍBORAS									
Alternativas	Bombeo Gracia-Morenita (154,2 l/s)	NO	SI		SI		SI		
	Recarga artificial (80 l/s)	NO	NO		SI		NO		
	Recarga artificial (160 l/s)	NO	NO		NO		SI		
Demandas		Garantías							
		G _m	G _v	G _m	G _v	G _m	G _v	G _m	G _v
Caudal ecológico río Viboras		66,2%	89,1%	83,0%	95,9%	83,0%	95,9%	83,0%	95,9%
Caudal ecológico río San Juan		94,9%	98,2%	85,1%	95,7%	87,7%	96,3%	87,7%	96,3%
Abastecimiento a Martos		90,5%	96,6%	90,2%	96,7%	90,2%	96,7%	90,2%	96,7%

Tabla 6 Resultado de la formulación de diferentes hipótesis de la operación de recarga artificial en el acuífero de Gracia-Morenita. Análisis de garantías.

Table 6. Results of applying diverse hypotheses to the artificial recharge operation to the Gracia-Morenita aquifer. Analysis of water supply guarantees.

mejor resultado, pero esa situación no es la ocurrente en la actualidad, ni la previsible en un futuro a corto o medio plazo.

Resultados obtenidos tras la aplicación de SIMGES al análisis de la recarga antrópica de tipo no programado que tiene lugar en el acuífero de Grajales.

El río Quiebrajano, antes de la construcción del embalse del Quiebrajano, era ganador en el tramo que abarca desde su nacimiento hasta las inmediaciones donde actualmente se localiza la cola de dicho embalse, ya que en ese tramo recibía las descargas de los acuíferos de Fresnedilla-Pico Maleza y Ventisquero. Esta situación no ha cambiado al día de hoy, dado que estos acuíferos no se explotan mediante bombeo.

Desde el lugar donde actualmente se localiza el vaso del embalse del Quiebrajano hasta la unión del río Frío con el río Quiebrajano, éste último era influente, por lo que todo el caudal que circulaba por el mismo se infiltraba a través del lecho del río para recargar al acuífero de Grajales, que drena al río Frío, a través de los manantiales de Mingo, constituyendo la principal fuente de alimentación hídrica del espacio de especial interés medioambiental que se conoce con el nombre de cañones de Mingo. No obstante, en épocas de grandes avenidas, circulaba agua a lo largo de todo el río Quiebrajano, aunque siempre conservando el carácter de río perdedor a partir del sector donde se ha erigido el embalse del Quiebrajano.

Una vez se construye el embalse del Quiebrajano (régimen influenciado) se interrumpe la circulación de agua por el tramo del río que abarca desde dicho embalse hasta la confluencia de los ríos Quiebrajano

y Frío. Esto afecta a la recarga del acuífero de Grajales y a la descarga de agua a través de los manantiales de Mingo. No obstante, dado que el vaso del embalse del Quiebrajano no es totalmente impermeable, se producen filtraciones a través del mismo, que en cierta medida paliar los efectos negativos, que la construcción del embalse provoca sobre el acuífero de Grajales y los manantiales de Mingo.

El acuífero de Grajales se ve actualmente afectado por una recarga de tipo involuntario o accidental, que tiene lugar a partir de las filtraciones que se producen en el embalse del Quiebrajano a favor de las formaciones calizo-dolomítico del Jurásico que afloran en su vaso. Dicha recarga no tiene un origen natural, por lo que se trata de una recarga artificial, aunque de tipo no programado.

Esta puntualización entra en conflicto con la definición más clásica que se da al término "recarga artificial", que incide en la consciencia y programación de dicha operación (Custodio, 1986). Ahora bien, estos condicionantes se refieren sobre todo a lo que los anglosajones denominan (Fernández Escalante y García Rodríguez, 2006) "Managed Aquifer Recharge", es decir a lo que se entendería por "Gestión de Recarga Artificial", por lo que el término recarga artificial podría emplearse para designar cualquier tipo de recarga que tiene lugar en un acuífero de una manera no natural (pérdidas y fugas en las redes de saneamiento, distribución, depósitos de almacenamiento de agua y embalses entre otras).

Al objeto de evitar conflictos y polémicas innecesarias, que contribuyen a un confusiónismo que no hace ningún bien a la integración de las aguas subterráneas en igualdad de condiciones con el resto de los elementos que conforman un sistemas de recursos hídricos, se propone designar con el término

recarga antrópica no programada (RANP) a toda recarga no natural que tiene lugar en un acuífero, como es el caso de la recarga que se produce en el embalse del Quiebrajano a partir de las filtraciones que se originan en su vaso. Esta recarga recibiría el nombre de recarga artificial una vez que el análisis de sistemas demuestre su carácter beneficioso, y se proceda a diseñar y programar un plan de gestión que coordine y conjugue el aprovechamiento que proporciona la recarga antrópica no programada con el que suministran y prestan el resto de los elementos que forman parte del sistema de recursos hídricos.

La cuantificación de la recarga antrópica no programada, que de forma accidental tiene lugar en el acuífero de Grajales, se ha realizado a través de la estimación de las pérdidas que se producen en el embalse del Quiebrajano y mediante el control de las descargas naturales del acuífero de Grajales.

Estas pérdidas se han evaluado (Figura 7) en 88 l/s para una cota de 755 m snm y en 224 l/s para una cota de 770 m snm. y la función polinómica que determina la curva de embalse (Figura 8) mediante las expresiones:

$$V(hm\mu)=-2,0818\cdot 10^1\cdot z+9,0226\cdot 10^{-2}\cdot z^2-1,3013\cdot 10^{-4}\cdot z^3+6,2466\cdot 10^{-8}\cdot z^4$$

para el volumen embalsado, y mediante

$$S(ha)=-4,3415\cdot 10^1\cdot z+1,8407\cdot 10^{-1}\cdot z^2-2,6184\cdot 10^{-4}\cdot z^3+1,2490\cdot 10^{-7}\cdot z^4$$

para el cálculo de la superficie de la lámina de agua libre respecto a la cota topográfica.

A partir de estos datos se ha establecido la siguiente ley potencial para evaluar las pérdidas por infiltración a partir del volumen embalsado:

$$V_{infiltrado}=0,0921\cdot V_{embalsado}^{0,692}$$

Esta expresión permite estimar que la recarga antrópica no programada que tiene lugar en el acuífero de Grajales es, como término medio, de $2,29 \times 10^6$ m³/a, para el periodo 1989-2002, con un rango de variación entre $1,64 \times 10^6$ y $8,19 \times 10^6$ m³/a.

El seguimiento de esta recarga de tipo accidental ha permitido comprobar (Figura 9) que la misma da

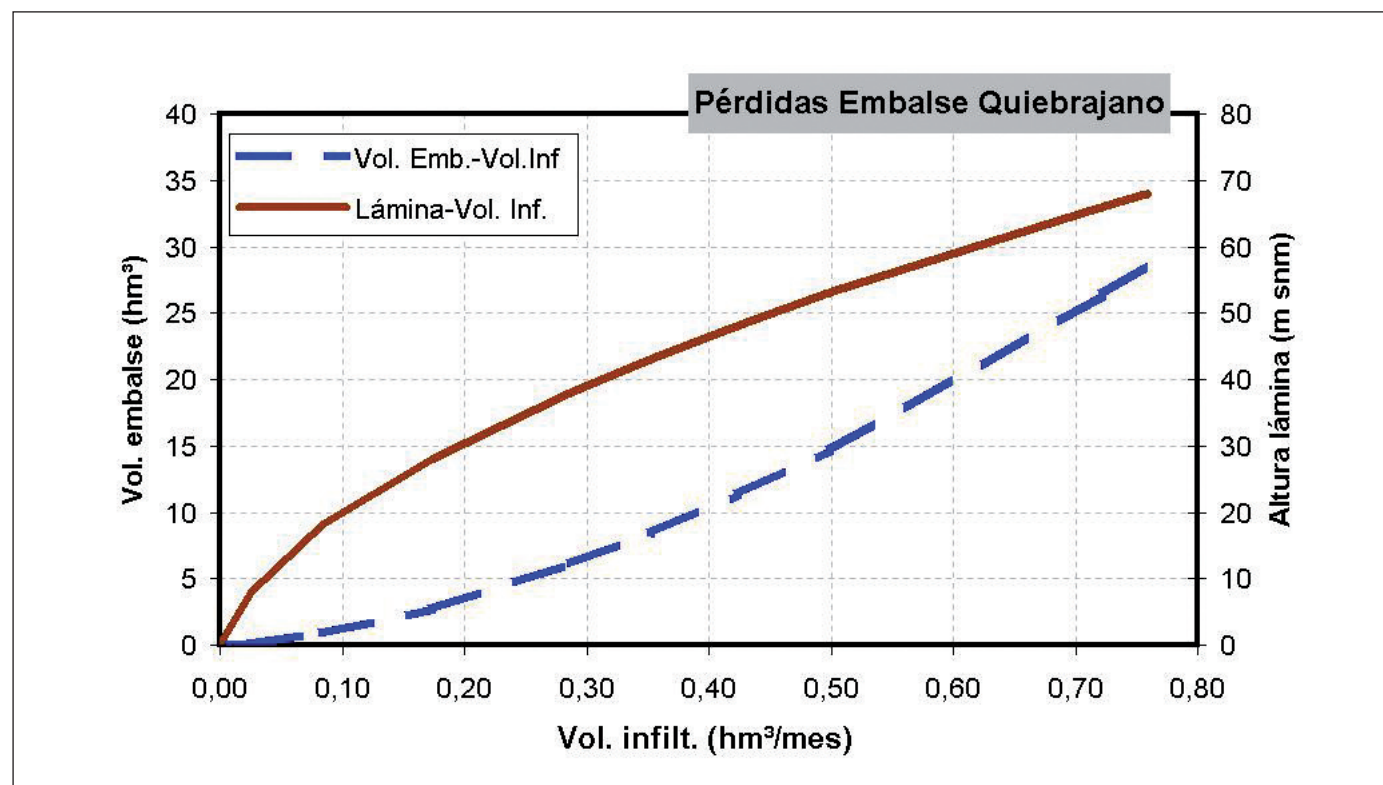


Figura 7 Pérdidas por infiltración en el vaso del embalse del Quiebrajano (la altura de lámina 0 equivale a la cota 717 m snm)

Figure 7. Water losses from seepage through the base of the Quiebrajano reservoir (the water level 0 is equivalent to an altitude of 717 m a.s.l.).

lugar a un incremento en el caudal que se descarga a través de los manantiales de Mingo, principal punto de drenaje del acuífero Grajales. Dicho caudal es de vital importancia para la conservación de una zona de especial interés ecológico, que se conoce con el nombre de cañones de Mingo, que se encuentra amenazada por la existencia de captaciones de agua para abastecimiento urbano (sondeos de La Merced y Peñas de Castro).

Dado que existe un proyecto que pretende impermeabilizar el embalse del Quiebrajano, lo que afectaría al efecto beneficioso y mitigador que sobre los caudales drenados por el manantial de Mingo tiene esta recarga involuntaria que se producen a partir de las filtraciones que tienen lugar en el vaso del embalse del Quiebrajano, se han analizado los resultados a los que daría lugar esta posible acción mediante el modelo de análisis global de recursos hídricos que se ha realizado para el sistema Quiebrajano-Víboras.

Por lo que se refiere a la recarga accidental, que tiene lugar en el acuífero de Grajales a partir de la filtraciones que se producen en el embalse del Quiebrajano, se han realizado dos simulaciones, que pretenden comparar (Tabla 7) la situación actual (se

producen filtraciones en el vaso del embalse) con la que tendría el sistema si el embalse se impermeabiliza. Los resultados obtenidos (Tabla 7) muestran que desde el embalse de Quiebrajano se podría suministrar un volumen medio anual de 8,06 millones de metros cúbicos, si el embalse se impermeabiliza, y 5,28 millones de metros cúbicos si no se impermeabiliza, por lo que desde un punto de vista exclusivo de la gestión del embalse, ésta mejora en 2,78 millones de metros cúbicos (Figura 10-a y 10-b).

Ahora bien, lo que se gana en suministro directo desde el embalse del Quiebrajano, se pierde con creces (3,67 millones de metros cúbicos) en el suministro que tiene lugar desde la toma de agua que capta los manantiales de Mingo, que en el caso del embalse sin impermeabilizar es de 9,06 millones de metros cúbicos, mientras que si éste se encuentra impermeabilizado es de sólo 5,39 millones de metros cúbicos (Figura 11-a y 11-b).

La descarga del acuífero de Grajales a través de los manantiales de Mingo es de 17,50 millones de metros cúbicos, si el embalse se impermeabiliza, y de 23,8 millones de metros cúbicos si no se impermeabiliza, por lo que el caudal ecológico que debe de cir-

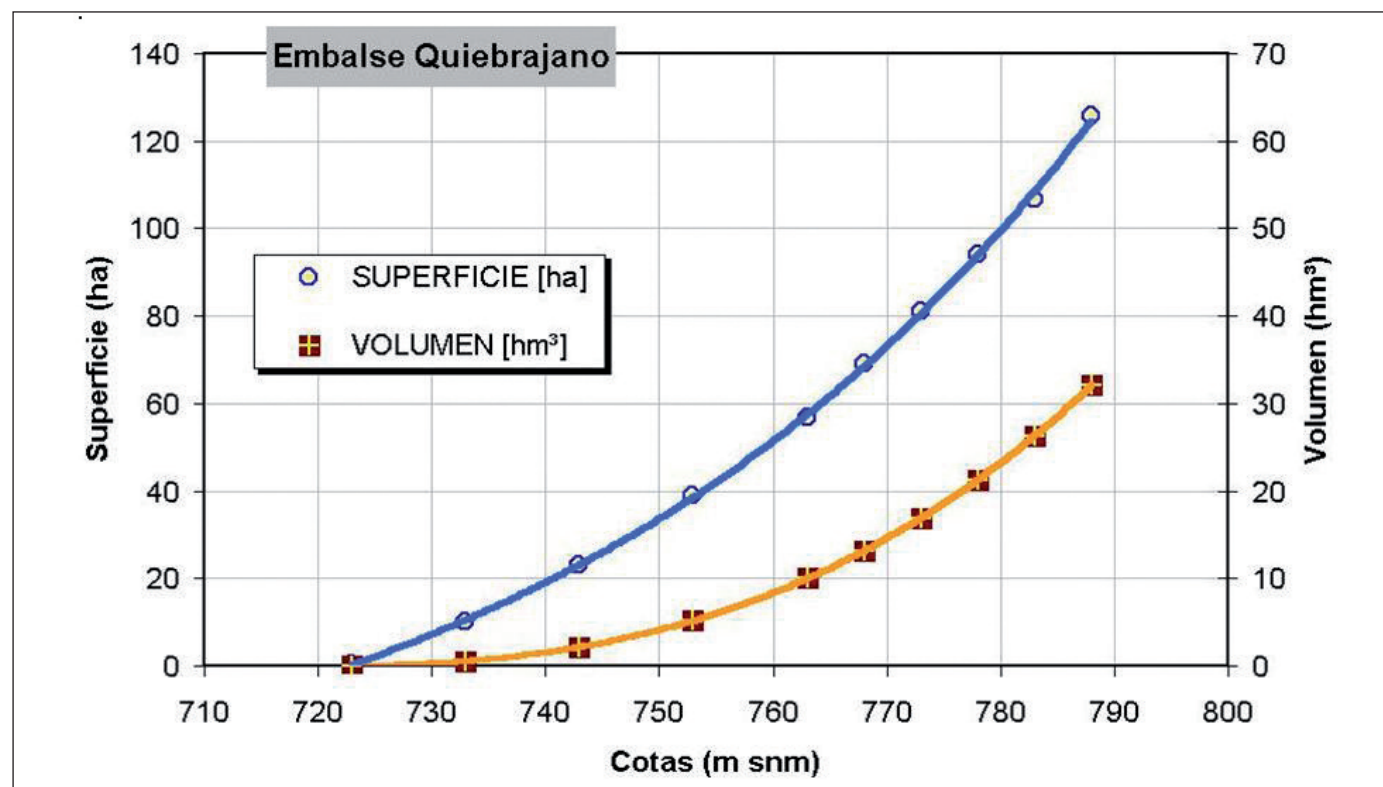


Figura 8 Curvas características del embalse Quiebrajano
Figure 8. Characteristic curves of the Quiebrajano reservoir.

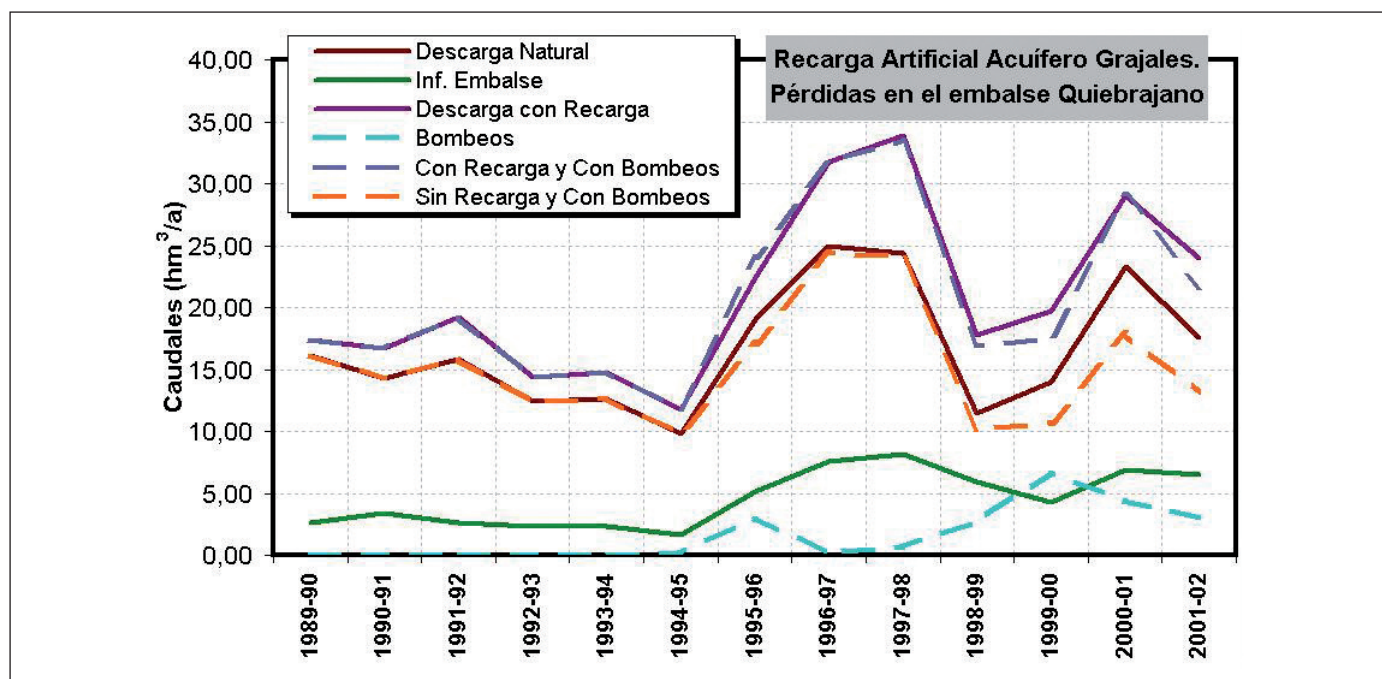


Figura 9. Simulación del efecto que sobre el acuífero Grajales ejerce la recarga antrópica no programada que tiene lugar en el embalse Quiebrajano. Análisis de la descarga en los manantiales de Mingo.

Figure 9. Simulation of the consequences to the Grajales aquifer of non-programmed human-effected recharge that takes place in the Quiebrajano reservoir. Analysis of discharge from the Mingo springs.

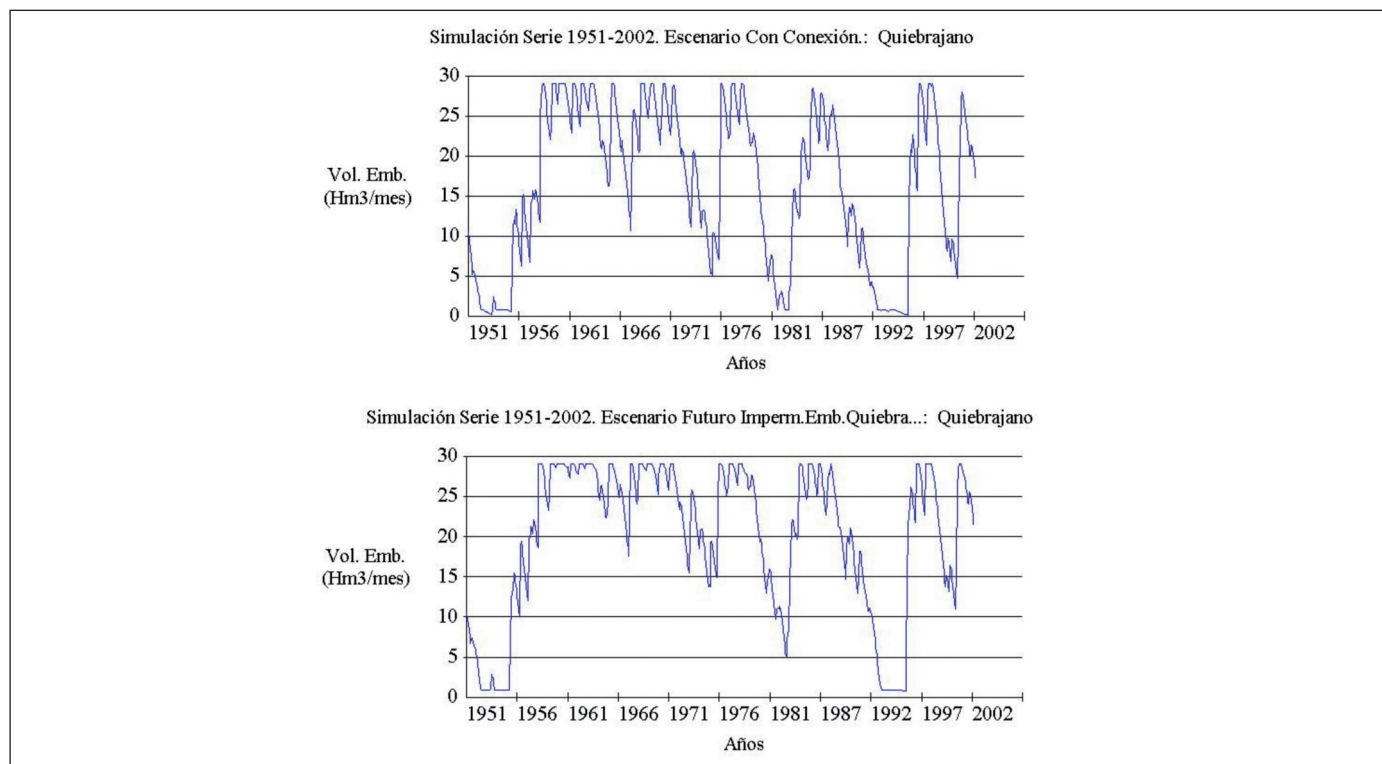


Figura 10 a). Evolución del volumen almacenado en el embalse Quiebrajano si no se impermeabiliza éste. b). Evolución del volumen almacenado en el embalse Quiebrajano si se impermeabiliza éste.

Figure 10 a). Evolution of the water volume stored in the Quiebrajano reservoir assuming no waterproofing. b). Evolution of the water volume stored in the Quiebrajano reservoir assuming waterproofing is carried out.

ELEMENTO DEL SISTEMA	Escenario sin impermeabilización en el embalse del Quiebrajano		Escenario con impermeabilización en el embalse del Quiebrajano	
	Anual (m ³ x10 ⁶)	Mensual promedio (m ³ x10 ⁶)	Anual (m ³ x10 ⁶)	Mensual promedio (m ³ x10 ⁶)
Agua suministrada desde el embalse del Quiebrajano	5,28	0,44	8,06	0,717
Bombes que es preciso realizar en el acuífero de Grajales	1,517	0,126	1,91	0,159
Descarga del acuífero de Grajales a través de los manantiales de Mingo	23,8	1,99	17,50	1,46
Recarga artificial de carácter no programado debida a las filtraciones que tienen lugar en el embalse de Quiebrajano	6,00	0,50	-	-
Agua suministrada desde la captación de los manantiales de Mingo	9,06	0,755	5,39	0,449
Garantía ecológica en los Cañones Mingo	Garantía mensual	Garantía volumétrica	Garantía mensual	Garantía volumétrica
	94,4 %	98,9 %	86,4 %	97,9 %

Tabla 7 Comparativa de escenarios de simulación entre las situaciones correspondientes a la impermeabilización o no impermeabilización del embalse del Quiebrajano

Table 7. Comparison of simulation scenarios for the situations corresponding to the waterproofing or otherwise of the Quiebrajano reservoir.

cular por los cañones de Mingo se satisface con una garantía mensual del 86,4% y una garantía volumétrica del 97,9% en el caso de que el embalse se impermeabilice, y con una garantía mensual del 94,4 % y una garantía volumétrica del 98,9 % en el caso de que el embalse no se impermeabilice (Figura 12-a y 12-b).

La comparación de ambos escenarios pone de manifiesto que la recarga antrópica de índole no programada, que tiene lugar sobre el acuífero de Grajales a partir de las filtraciones que se producen en el embalse del Quiebrajano, mejora los índices de garantía del caudal ecológico, que debe de circular por los cañones de Mingo, al tiempo que se satisface la demanda para abastecimiento urbano mediante tres tipos de actuaciones: suministro directo desde el embalse, bombeo en el acuífero y captación del agua drenada por los manantiales de Mingo aguas abajo del lugar donde se produce la surgencia de agua subterránea para permitir el mantenimiento del caudal ecológico en los cañones de Mingo.

Conclusiones

El empleo de herramientas de simulación, como el paquete AQUATOOL y más concretamente su módulo SIMGES, que permitan la modelación matemática de sistemas complejos, que incluyan la utilización de

recursos de agua de tipo superficial, subterránea y no convencional se tercia una opción adecuada para analizar la efectividad de un elemento del sistema de recursos hídricos tan singular como es la recarga artificial de acuíferos en sus distintas variantes.

El análisis de una operación de este tipo, por lo que respecta al tiempo de permanencia del agua en el acuífero, se puede abordar en una primera instancia mediante el empleo de modelos de tipo unicelular integrados en SIMGES, que permiten obtener datos sobre el coeficiente de agotamiento y el periodo de semiagotamiento, para cada uno de los acuíferos del sistema de recursos hídricos sobre los que se pretende realizar un primer análisis que evalúe la efectividad de plantear posibles operaciones de recarga artificial de acuíferos. Si los resultados que se obtuvieran con estos modelos simplificados no fueran adecuados sería necesario recurrir a otras metodologías.

Así se ha operado para el sistema de recursos hídricos del Quiebrajano-Víboras obteniéndose unos resultados que en general manifiestan unas escasas posibilidades, ya que el periodo de semiagotamiento (tiempo que un acuífero tarda en reducir su caudal de descarga a la mitad desde que tiene lugar el evento de recarga) es relativamente corto. Es decir se trata de acuíferos que tras un episodio de recarga natural o artificial evacúan rápidamente el agua que llega hasta los mismos. Éste era un resultado que cabía

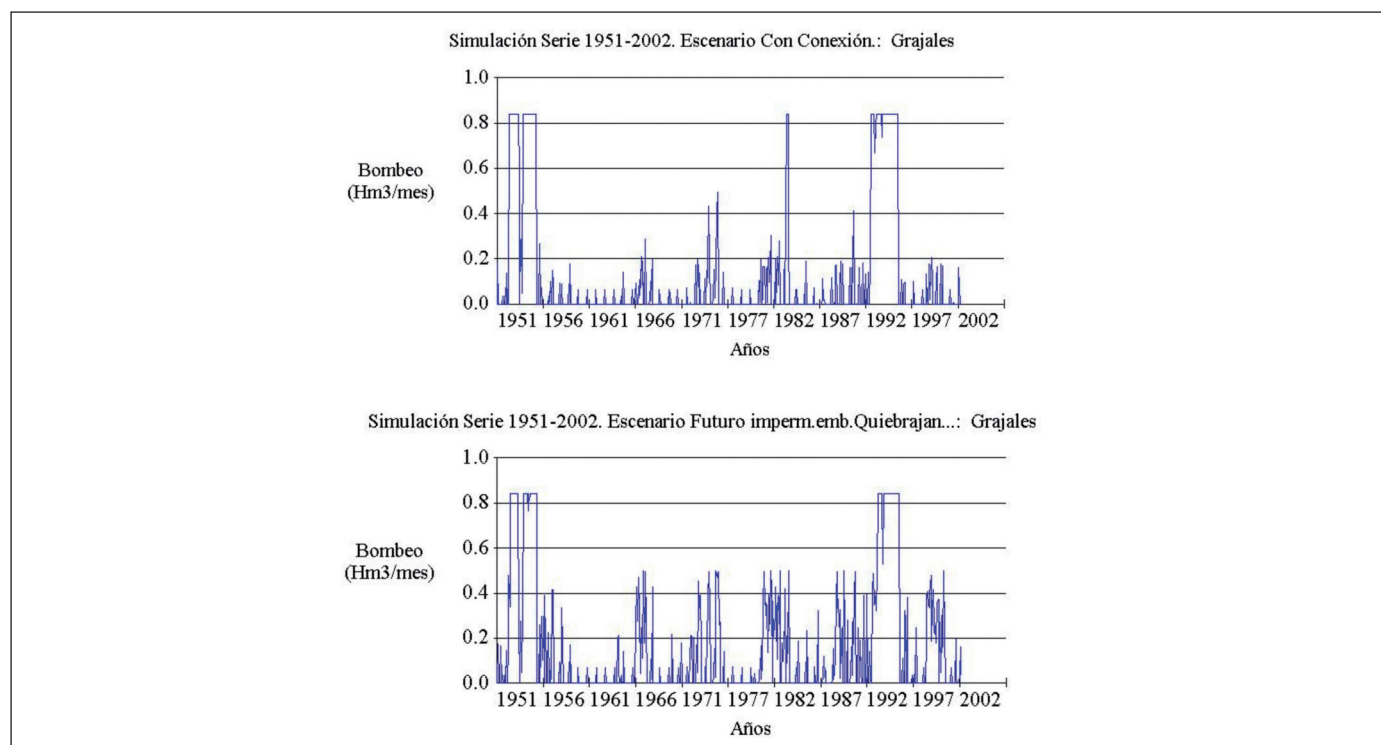


Figura 11 a). Bombeos que es preciso realizar en el acuífero de Grajales si no se impermeabiliza el embalse Quiebrajano. b). Bombeos que es preciso realizar en el acuífero de Grajales si se impermeabiliza el embalse Quiebrajano.

Figure 11 a). Pumping from the Grajales aquifer that would be needed if no waterproofing of the Quiebrajano reservoir were carried out. b). Pumping from the Grajales aquifer that would be needed if waterproofing of the Quiebrajano reservoir were carried out.

esperar, pues son numerosos los acuíferos del sistema Quiebrajano-Víboras de tipología kárstica, escasa extensión superficial y descarga focalizada.

Atendiendo únicamente al coeficiente de agotamiento y al periodo de semiagotamiento se estima que la recarga artificial puede ser efectiva en ciertos acuíferos como Grajales, Carchel, Cornicabra-Noguerones, Montesinos, Ventisqueros y Gracia-Morenita, pero su actual grado de aprovechamiento y el nivel de explotación a que se encuentra sometido el sistema Quiebrajano-Víboras, bajo una óptica global de aprovechamiento alternativo y coordinado de cualquier tipo de fuente de agua, no hace que sea preciso contemplar a corto o medio plazo operaciones de este tipo en dichos acuíferos.

En aquellos acuíferos que presentan un grado de explotación próximo o claramente insostenible, la recarga artificial podría ser efectiva mientras se subsana dicha situación, pero una vez se alcance el nivel de equilibrio se originaría, debido a la escasa regulación que presentan estos acuíferos (corto periodo de semiagotamiento), una rápida expansión del agua recargada en el acuífero hacia los lugares por donde éste drena de forma natural. Este es el caso de los

acuíferos de Peña de Jaén, Castillo-La Ímora, Lías y Dogger de Jabalcuz, Cerro Fuente y Ahillo.

Las simulaciones realizadas con SIMGES han puesto de manifiesto que existen otras soluciones probablemente más baratas para recuperar los acuíferos sobreexplotados, como es la clausura y sustitución de las captaciones situadas sobre los acuíferos sobreexplotados por otras localizadas en embalses subterráneos que presentan una reducida o nula explotación. Ésta es la opción técnica que en principio parece más apropiada, a falta de realizar modelos numéricos de flujo de parámetros distribuidos, para paliar la sobreexplotación o mejorar la actual situación de explotación de las aguas subterráneas en los acuíferos Dogger y Lías de Jabalcuz y Castillo-La Ímora.

SIMGES también permite estimar las disponibilidad de agua para realizar operaciones de recarga artificial de acuíferos y el grado de garantía con la que ésta puede ser dispuesta en cada instante. A este respecto se ha comprobado que en el Sistema Quiebrajano-Víboras existe disponibilidad de agua para recargar los acuíferos de Ahillo y Gracia-Morenita.

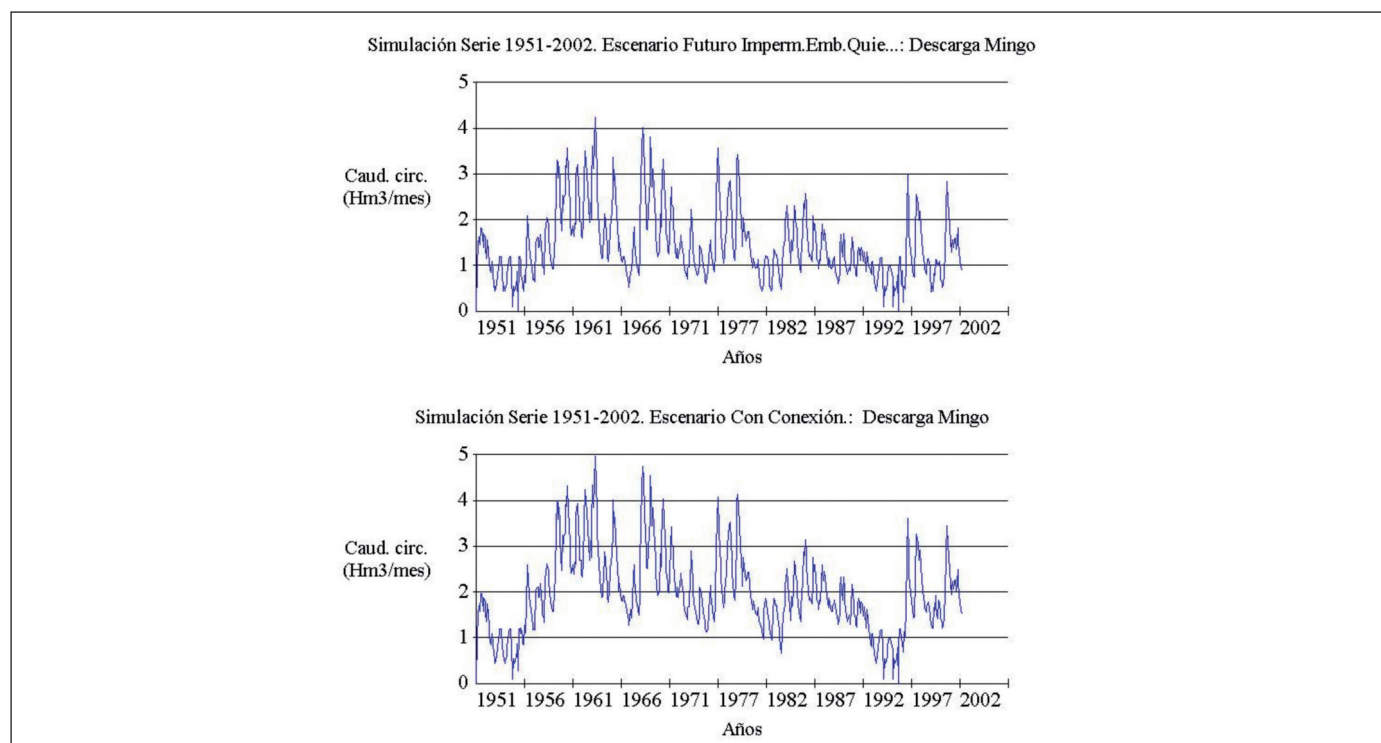


Figura 12 a). Descargas por los manantiales de Mingo si no se impermeabiliza el embalse del Quiebrajano. b). Descargas por los manantiales de Mingo si se impermeabiliza el embalse del Quiebrajano.

Figure 12 a). Discharge from the Mingo springs if no waterproofing of the Quiebrajano reservoir were carried out.

b). Discharge from the Mingo springs if waterproofing of the Quiebrajano reservoir were carried out.

Por lo que respecta al primero la efectividad de la recarga depende de condicionantes tales como la calidad del agua que se puede emplear en la operación de recarga y la relativamente baja capacidad de regulación que presenta el embalse subterráneo de Ahillo.

En relación con el segundo se han formulado mediante el uso de SIMGES diferentes hipótesis de gestión, que pueden contemplar o no operaciones de recarga artificial y la explotación del acuífero de Gracia-Morenita mediante la puesta en funcionamiento de los sondeos del Víboras. Los resultados que se obtienen en cualquiera de los casos simulados no muestran diferencias notables en la garantía que se obtiene para el abastecimiento urbano de la comarca de Martos, aunque si dan lugar a un incremento de la garantía de los caudales ecológicos en la cabecera del río Víboras, aunque a costa de disminuir la garantía de los caudales ecológicos en el Nacimiento del río San Juan, si se explota el acuífero de Gracia-Morenita.

La afección al Nacimiento del río San Juan no se vería paliada por la puesta en funcionamiento de una instalación de recarga artificial en el acuífero de

Gracia-Morenita. La escasa efectividad de esta recarga artificial, en términos de garantía, se debe a la baja capacidad de regulación del acuífero calizo-dolomítico de Gracia-Morenita y a la escasa disponibilidad de recursos hídricos para recargar. Es probable que en el caso de una mayor explotación del acuífero de Gracia-Morenita la recarga artificial aportaría un mejor resultado, pero esa situación no se da en la actualidad, ni es previsible que ocurra en un futuro a corto o medio plazo. Por otro lado resulta que no es posible realizar una operación de recarga artificial de mayor envergadura, ya que no se dispone de recursos excedentarios para efectuar la misma sin afectar al resto de las demandas o a la regulación del embalse del Víboras.

Los resultados obtenidos ponen de manifiesto que no se operó correctamente cuando se construyó, sin ningún estudio previo de modelación, la instalación de recarga artificial en el acuífero de Gracia-Morenita, pues el análisis de sistemas, que se ha expuesto y realizado en el presente artículo, ha demostrado que no resulta efectiva. Dicho análisis también pone de manifiesto que el modelo numérico de parámetros distribuidos que se realizó una vez construida dicho

instalación, para analizar la operación de recarga artificial, debería de haber estado precedido de un modelo de análisis global de recursos hídricos. Evidentemente, si se hubiera operado en orden inverso (modelo de análisis global de recursos hídricos-modelo numérico de parámetros distribuidos-construcción de una instalación experimental de recarga artificial) se hubiera ahorrado tiempo y dinero.

Por lo que respecta a la recarga antrópica de tipo accidental, que tiene lugar a partir de las filtraciones que se producen en el embalse de Quiebrajano, los resultados obtenidos, tras la aplicación del modelo de análisis global de recursos hídricos, muestran que tiene una vital importancia, tanto para mejorar la garantía del caudal ecológico en los cañones de Mingo, como para satisfacer la demanda para abastecimiento urbano de Jaén capital y municipios de la mancomunidad del Quiebrajano. La impermeabilización del embalse del Quiebrajano implicaría la mejora sustancial de este elemento de regulación, pero no la global del sistema.

Dada la efectividad que muestra dicha recarga accidental y el resultado positivo que produce sobre el acuífero de Grajales, se debería proceder a programar y operar la misma conjuntamente con el embalse del Quiebrajano, lo que mejoraría la gestión global del sistema de recursos hídricos del Quiebrajano-Víboras. A partir de ese momento dicha recarga accidental podría considerarse como una recarga artificial que utiliza como dispositivo de infiltración un embalse de vaso permeable.

La principal conclusión que se desprende del trabajo realizado indica que es recomendable abordar el estudio de una instalación de recarga artificial en conjunción con el resto de los elementos que conforman el sistema de explotación. Esto concuerda con la filosofía que preside el uso conjunto y la gestión integral de los recursos hídricos que apuesta por una utilización coordinada de todas las fuentes de agua (convencionales y no convencionales, bien sean estas locales o externas) al objeto de alcanzar un marco de equilibrio y sostenibilidad en el uso racional del agua.

Aunque el objetivo del estudio que se presenta en este artículo se ha limitado a la evaluación de la disponibilidad hídrica para realizar la operación de recarga artificial, a la estimación de la garantía con la que se obtiene dicha disponibilidad y a la valoración de la aptitud hidrodinámica de los acuíferos receptores frente a la operación de recarga artificial, se ha hecho alusión a lo largo del artículo a los diferentes y a veces elevados costes de las operaciones de recarga artificial. En concreto se ha mencionado varias veces el derivado del transporte del agua hasta la instalación de recarga cuando la distancia es grande y la

cota de elevación importante. A este respecto cabe indicar que una vez constatada la viabilidad técnica de la operación de recarga artificial es cuando se debe proceder a realizar el análisis económico de dicha operación, ya que antes se puede carecer de información suficiente para abordar dicho análisis con garantías de éxito.

Por último indicar que, aunque los resultados que se muestran en el presente análisis no sean muy efectivos desde el punto de vista de la aplicación de la técnica de la recarga artificial, esto no presupone que dicha tecnología no sea la mejor opción posible en otros lugares, situaciones y escenarios.

Agradecimientos

El presente artículo deviene de una serie de colaboraciones que el IGME mantiene con el Instituto Andaluz del Agua (Agencia Andaluza del Agua). Los trabajos sintetizados en la misma han sido posibles gracias a la colaboración de diferentes organismos públicos y empresas de carácter privado y estatal. En particular se agradece la especial colaboración mostrada por la Delegación de Medio Ambiente de Jaén (en la persona de Inmaculada Ortuño); la Delegación en Jaén de la Confederación Hidrográfica del Guadalquivir (en la persona de Juan de Dios Gallego); la Diputación Provincial de Jaén (en las personas de Juan de Dios Olite y Miguel Rosales); la Sociedad Estatal AQUAVIR (en la persona de Antonio Sandoval); las empresas Aqualia (Jaén y Martos) e HidroGestión (Alcaudete); los Ayuntamientos de Los Villares, Valdepeñas de Jaén y Fuensanta de Martos; el equipo técnico de la Oficina de Proyectos del IGME en Granada (particularmente Juan Carlos Rubio y Antonio González); la ETSI de Montes de Madrid, que realizó el cálculo de los caudales ecológicos (particularmente Domingo Baeza); la ETSI de Caminos de Valencia (en las personas de Abel Solera y Andrés Sahuquillo por su constante asesoramiento); María Estirado e Isabel Clara Rodríguez del Instituto Andaluz del Agua, codirectoras del proyecto; y muy especialmente Juan López Martos y Juan Antonio López Geta promotores e impulsores de la idea.

Referencias

- Andreu Álvarez, J. 1993. Análisis de sistemas y modelación. Conceptos y Métodos para la planificación hidrológica (Ed. Andreu, J.). Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería CIMNE. Barcelona. pp. 25-33.
- Andreu, J. y Capilla, J. 1993. El modelo de gestión de cuencas SIMGES. En Andreu, J. (ed) "Conceptos y métodos

- para la planificación hidrológica" CIMNE. Barcelona, pp. 298-321.
- Baeza Sanz, D. y Vizcaino Martinez, P. 2008. Estimación de caudales ecológicos en dos cuencas de Andalucía. Uso Conjunto de aguas superficiales y subterráneas. *Ecosistemas*. 17 (1). <http://www.revistaecosistemas.net>
- Bovee, K.D. 1982. A guide to Stream Habitat. Analysis using the Instream Flow Incremental Methodology. Instr. Flow Inf. Paper 12. USDI Fish and Wildl. Serv. Washington. 248 pp.
- Benavente, J; Fernández Rubio, R. y Pulido, A. 1979. Contribución al conocimiento hidrogeológico de la Sierra de Jaén. *Hidrogeología y Recursos hidráulicos*. 5. 569-588.
- Castaño, S.; Murillo, J.M y Rodríguez Hernández, L. 2000. Establecimiento de reglas de operación y recomendaciones de gestión de los recursos hídricos de la Marina Baja de Alicante mediante el empleo de un modelo mateático de simulación conjunta. *Boletín Geológico y Minero*. 111- 2 y 3, 63-118.
- S. Castaño Castaño y J. M. Murillo Díaz Castaño, S. y Murillo, J.M. 2001. Papel de los recursos hídricos subterráneos en el esquema general del suministro conjunto de agua a la comarca de la Marina Baja de Alicante. *Boletín Geológico y Minero*. 112. (1). 77-95.
- Collazos, G; Andreu, J y Pulido, M. 2004. Metodología y herramientas para el análisis económico de sistemas de recursos hídricos. IV Congreso ibérico sobre gestión y planificación del agua. Versión en CD-Rom.
- COPTJA-ITGE. 1996. Reconocimiento hidrogeológico y ejecución de sondeos de investigación en el sector Quiebrajano-Víboras. Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía e Instituto Tecnológico Geominero de España. Informe inédito.
- Custodio, E. y Vilaró, F. 1976. Métodos de recarga artificial: aspectos generales. *Hidrología Subterránea* (Ed. Custodio, E. y Llamas, M.R.). Editorial Omega. Barcelona. pp. 1970-1991
- Custodio Gimena, E. 1986. Recarga Artificial de Acuíferos. Avances y Realizaciones. *Boletín de Informaciones y Estudios* n° 45. Servicio Geológico. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo. 134 pp.
- Degallier, R. 1972. Un modèle de simulation des écoulements superficiels et souterrains le modèle SIMERO. *Bulletin BRGM*. 111.3.23-42.
- DJ-ITGE. 1997. Atlas hidrogeológico de la provincia de Jaén. Diputación Provincial de Jaén e Instituto Tecnológico Geominero de España. 175pp.
- Estrela, T. 1992. Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. CEDEX. 55 pp.
- Fernández Escalante, A. E. y García Rodríguez, M. 2006. Gestión de la recarga artificial de acuíferos (MAR). *Grafinat*. Madrid. 136 pp.
- García de Jalón, D. 1990. Técnicas hidrobiológicas para la fijación de caudales ecológicos mínimos. En Libro homenaje al profesor D.M. García de Viedma. Ramos, A.; Notario, A. y Baragaño, J.R. (Editores). Universidad Politécnica de Madrid. 183-196.
- González Ramón, A. 2001. Contribución al conocimiento hidrogeológico e hidroquímico del acuífero kárstico de Gracia-Morenita (provincia de Jaén). Tesis de Licenciatura. Universidad de Granada.
- González Ramón, A; Navarro Iáñez, J.A.; Murillo, J.M.; López Martos, J; López Geta, J.A. y Rubio Campos, J.C. 2004. Análisis de la gestión conjunta del sistema Quiebrajano-Víboras (JAÉN, ESPAÑA) IV Congreso ibérico sobre gestión y planificación del agua. Versión en CD-Rom.
- González Ramón, A; Rubio Campos, J.C.; López Geta, J.A.; Ortuño Alcaraz, I.; Martos Rosillo, S.; Santiago Martín, A.; Peinado, T. y Ortuño Morales, A. 2002. Los acuíferos de la cabecera del río Víboras, potencial hídrico garante del abastecimiento a la comarca de Martos y al sistema Quiebrajano. En López-Geta, J.A. y Rubio Campos (Editores). Presente y futuro de las aguas subterráneas en la provincia de Jaén. Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas N° 7.351-354.
- IGME-AAA. 2005. Elaboración de directrices para la incorporación de criterios de calidad en la modelización de esquemas de utilización conjunta. Aplicación al abastecimiento del conjunto Quiebrajano-Víboras. Instituto Geológico y Minero de España y Agencia Andaluza del Agua. Informe Inédito. 362 pp.
- ITGE-COPTJA. 2000. Mejora del conocimiento del acuífero Gracia-Morenita para la evaluación de las posibilidades de recarga artificial como apoyo a los abastecimientos públicos. Instituto Tecnológico Geominero de España y Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía. Informe inédito.
- Lluria, Mario R. 1996. Recuperación de aguas residuales para recarga artificial. En *Agua: Desafíos y Oportunidades para el Siglo XXI*. Gobierno del Estado de Aguascalientes. pp. 243-248.
- López García, J. 1993. Simulación de sistemas de recursos hidráulicos. Conceptos y Métodos para la planificación hidrológica (Ed. Andreu, J.). Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería (IMNE. Barcelona). pp. 125-135.
- López Geta, J.A. 2002. Los acuíferos de la provincia de Jaén. En López-Geta, J.A. y Rubio Campos (Editores). Presente y futuro de las aguas subterráneas en la provincia de Jaén. Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas N° 7. 15-29.
- Mangin, A. 1982. L'approche systémique du karst, conséquences conceptuelles et méthodologiques. Reunión Monográfica Karst Larra. Diputación Foral de Navarra. Pamplona. 141-157.
- Molina Molina, A; Ortuño Alcaraz, I; González Ramón, A; Rubio Campos, J.C; Rosales_Peinado, M y Barba-Romero, J. 1996. Proyección de aguas subterráneas en la cabecera del río Víboras (Jaén). Resultados preliminares. IV Simposio sobre el agua en Andalucía. Almería. 1. 295-304.
- Mukhopadhyay, A.; Al-Sulaimi, J. y Al-Sumait, A.A. 1998. Creation of potable water reserve in Kuwait through artificial recharge. Artificial Recharge of Groundwater (Ed. Peter, H.) Proceeding of the third international symposium

- sium on artificial recharge of groundwater -TISAR 98- Amsterdam (Netherlands). pp. 175-180.
- Murillo Diaz, J.M. y del Pozo, M. 1991. Artificial recharge experience at the "rio Oja" quaternary aquifer. XXIV Congreso de la A.I.H.R. Madrid. 8 pp.
- Murillo, J.M.; Mediavilla, C.; Díaz-Pérez, A. y Moreno, M. 1994. Primeros resultados y perspectivas futuras de la recarga artificial en el acuífero aluvial del bajo Guadalquivir. Congreso Nacional de Agua y Medi Ambiente. Zaragoza. 213-221.
- Murillo, J.M.; Rodríguez Medina, I.C.; Rubio Campos, J.C. y Navarro lañez, J. A. 2005. Mantenimiento hídrico de cursos fluviales y uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas. Aplicación al sistema de explotación Quiebrajano-Víboras (Jaén). En López-Geta, J.A.; Rubio Campos, J.C. y Martín-Machuca (Editores) VI Simposio del Agua en Andalucía. Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas N° 14. Tomo II. 789-798.
- Murillo, J.M. y Navarro, J.A. 2006. Caudales ecológicos y gestión conjunta de recursos hídricos. Aplicación al sistema Quiebrajano- Víboras (Jaén). III Congreso de Ingeniería Civil, Territorio y Medio Ambiente. Zaragoza. Versión en CD-Rom
- Oaksford, E.T. 1985. Artificial Recharge: Methods, Hydraulics, and Monitoring, In: Artificial Recharge of Groundwater, T. Asamo, editor. Butterworth Publishers, Boston, pp. 69-127.
- Ortuño Alcaraz, I. 2002. Los planes de la Consejería de Obras Públicas y Transportes de la Junta de Andalucía en materia de abastecimiento en la provincia de Jaén. En López-Geta, J.A. y Rubio Campos (Editores). Presente y futuro de las aguas subterráneas en la provincia de Jaén. Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas N° 7.215-221.
- Paredes, J; Solera, A. y Andreu, J. 2007. Modelo GESCAL de simulación de calidad de aguas. Manual de usuario v 1.0. Universidad Politécnica de Valencia. 111pp.
- Perez Paricio, A. y Carrera, J. 1999. Clogging handbook. Informe no publicado. Universidad Politécnica de Cataluña. 118 pp.
- Pulido, D.; Sahuquillo, A.; Andreu, J. y Pulido, M. 2006. Simulación del flujo subterráneo en sistemas complejos de uso conjunto. Universidad Politécnica de Valencia. 73pp.
- Pyne R. D. G. 1995. Groundwater Recharge and Wells: A Guide to Aquifer Storage and Recovery, Lewis Publishers
- Rorabaugh, M.I. 1963. Estimating changes in bank storage and groundwater contribution to stream flow. General Assembly of Berkeley. International Association Science Hydrologic. 63. 432-441.
- Rubio Campos, J.C. 2002. Planes de investigación seguidos y previstos por el IGME en la provincia de Jaén. . En López-Geta, J.A. y Rubio Campos (Editores). Presente y futuro de las aguas subterráneas en la provincia de Jaén. Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas N° 7.177-197.
- Sahuquillo Herraiz, A. 1983. El método de los autovalores. Curso sobre utilización conjunta de aguas superficiales y subterráneas. Servicio Geológico de Obras Públicas- Universidad Politécnica de Valencia. Valencia-Castellón de la Plana. Documento B-8. pp. 1-8.
- Samper Calvete, F.J y García Vera, M.A. 1998. Inverse modeling of groundwater flow in the semiarid evaporitic closed basin of Los Monegros, Spain. *Hydrogeology Journal*. 6. (1). 33-49.
- Sanz, E. 1997. Simulación de la recarga artificial de un acuífero en su manantial. Aplicación al manantial de Vozmediano (Soria). *Estudios Geológicos*. 53.17-23.
- Temez, J.R. 1977. Modelo matemático de transformación precipitación aportación. Asociación de Investigación Industrial Eléctrica (ASINEL).

Recibido: agosto 2008

Aceptado: noviembre 2008