

# INFLUENCIA ANTRÓPICA EN UN ACUÍFERO COSTERO. CONSIDERACIONES SOBRE LA GESTIÓN HÍDRICA DEL ACUÍFERO DE MOTRIL-SALOBREÑA (ESPAÑA)

J. G. Heredia DÍAZ <sup>1</sup>  
J. M. Murillo DÍAZ  
J. L. García ARÓSTEGUI  
J. C. Rubio CAMPOS  
J. A. López GETA

## ABSTRACT

The Motril- Salobreña coastal aquifer -Granada, Spain- is constituted by alluvial and piedmontite deposits. The Guadalfeo river is the most important stream in the area and has a great influence on the groundwater system. The building of the Rules dam will cause a strong modification on the Guadalfeo flow regime and on the alluvial runoff whatever the conjunctive use scheme is defined in the future. Agriculture is very important in the regional economy. The irrigation uses exclusively water from the Guadalfeo river; surface water abundance has permitted the use of high application rates with significant returns associated. The anthropic action is an important factor in this groundwater system, because it generates the greatest aquifer recharge: irrigation returns and induced recharge from the river. IGME studied the impact of the Rules dam on the aquifer using a numeric model. This paper complements and is the continuation of that first study. This work studies the impacts on the aquifer if the agricultural activities are modified. Such impacts will be more important than the ones created by the dam construction.

**Key words:** water balance, environmental impact, flow modelling, Motril-Salobreña aquifer

## RESUMEN

El acuífero costero de Motril-Salobreña -Granada, España- está formado por depósitos aluviales y piedemontes. El río Guadalfeo drena la vertiente sur de Sierra Nevada y atraviesa e influye notoriamente al acuífero. La construcción de la presa de Rules, situada aguas arriba del acuífero, producirá una alteración en el caudal y el flujo circulante por el aluvial del río. La agricultura es la actividad preponderante en la zona. En general, el riego se realiza con aguas del Guadalfeo, la abundancia del recurso favorece la aplicación de dotaciones altas y el desinterés por emplear técnicas de ahorro hídrico. Los retornos de regadío representan un tercio de la recarga media del acuífero, correspondiendo otro tercio a la recarga inducida por bombeos en las márgenes del río. La actividad humana es un factor esencial en el sistema acuífero al propiciar las recargas más importantes. El IGME analizó en primera aproximación, mediante un modelo numérico, el impacto que en el acuífero ocasionará la presa de Rules. Este trabajo complementa y es una extensión de aquel estudio y analiza el impacto que sobre el acuífero produciría una modificación en la actividad agrícola. Este será aún mayor al producido por la presa.

**Palabras clave:** balance hídrico, impacto medioambiental, modelo de flujo, acuífero de Motril-Salobreña

## INTRODUCCIÓN

El acuífero costero de Motril-Salobreña se sitúa en la provincia de Granada y su extensión es de 47 km<sup>2</sup> (Figura 1). El acuífero está

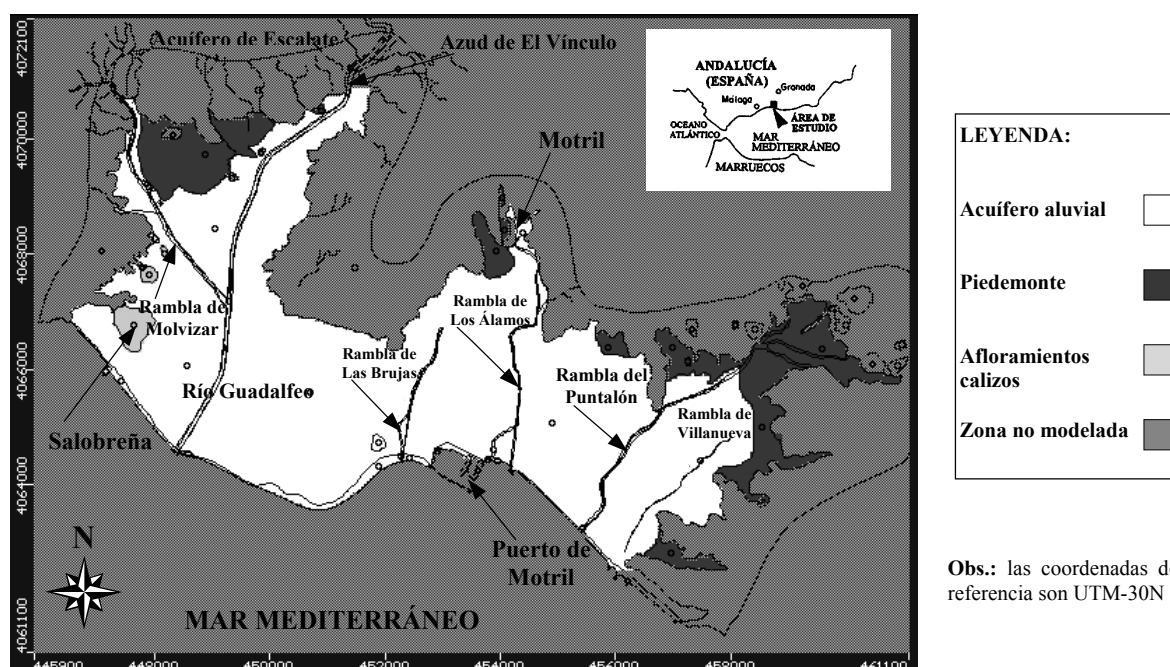
constituido por depósitos aluviales y piedemontes. El principal curso de agua que lo atraviesa es el río Guadalfeo que drena la vertiente sur de Sierra Nevada, lo que le confiere

<sup>1</sup> Instituto Geológico y Minero de España (IGME). E-mail: j.heredia@igme.es, jm.murillo@igme.es, murcia@igme.es, granada@igme.es y lopezgeta@igme.es

ingentes recursos hídricos. El río influye notoriamente en el acuífero. Debido a ello la construcción de la presa de Rules, que se situará aguas arriba del acuífero, producirá una fuerte alteración sobre el caudal del río Guadalfeo y en el flujo circulante por su aluvial, independientemente del esquema de gestión conjunta que se adopte.

La agricultura ocupa un lugar destacado en la economía de la zona. La caña de azúcar, introducida en el medioevo por los árabes, históricamente ha sido el cultivo hegemónico y ocupa el 29% de la superficie del acuífero. Actualmente está siendo sustituido paulatinamente por cultivos más rentables - leñosos subtropicales, hortalizas al aire libre y bajo invernadero, cuya ocupación relativa de superficie es del 23.5%, 31.2% y 1.5%, respectivamente-. El riego se realiza casi

exclusivamente con aguas del río Guadalfeo. La abundancia de este recurso ha propiciado la aplicación de elevadas dotaciones y el desinterés por emplear técnicas que impliquen una mayor economía hídrica. Estrictamente, el único cultivo con riego exclusivo mediante goteo es la huerta bajo invernadero, en general los restantes se riegan por gravedad. Debido a ello, los retornos de regadío representan un tercio de la recarga media anual del acuífero. Otro tercio de la recarga se debe a los importantes bombeos situados en las márgenes del río asociados a la antigua industria azucarera y a la papelera, que propician la recarga inducida del acuífero. La actividad humana es un factor esencial en este sistema de flujo, pues origina las recargas más importantes del acuífero: retorno de riego y recarga inducida a partir del río.



**Figura 1:** Sistema Hidrogeológico: acuífero de Motril-Salobreña, afloramientos calizos y piedemontes.

En este trabajo se estudia mediante simulación numérica, el impacto a diez años que causarían en el acuífero cambios en la práctica agrícola. Algunos de éstos cambios atenderían a la evolución del mercado y otros serían el resultado de la planificación en la gestión del recurso, diseñada tanto en el proyecto de la presa de Rules como en trabajos de ámbito regional. Las hipótesis de trabajo consideran tanto la construcción de la presa, como la situación actual. Los resultados muestran que al estudiar el impacto de una obra hidráulica es menester considerar tanto los efectos hidráulicos que ella produce como la incidencia de la gestión de recursos que se planifica. Habida cuenta que esta última puede ocasionar una alteración del

sistema de flujo mayor que el impacto que produciría la construcción de la obra hidráulica.

## OBJETIVOS

El IGME (2000) analizó en una primera aproximación, mediante simulación numérica, el impacto que en el acuífero ocasionará la presa de Rules. Los escenarios correspondieron a dos efectos ciertos que tendrá la construcción de la presa sobre el acuífero: la práctica anulación del flujo por el aluvial del río aguas abajo de la presa -eliminando esta entrada al acuífero- y una mengua apreciable del caudal circulante que pasará a ser el caudal ecológico de diseño. Los resultados permitieron predecir un impacto relativamente leve respecto a la situación actual,

si las restantes condiciones del acuífero se conservan inalterables.

Sin embargo, conjuntamente a la construcción de la presa se prevén modificaciones en la actividad agrícola que se desarrolla en la zona. Habida cuenta de la gran incidencia que el retorno de regadío tiene en la recarga del acuífero, se supone que cualquier cambio en el mismo repercutirá en la evolución del sistema. Ello motiva el objetivo de este estudio:

Analizar en primera aproximación el impacto que sobre el acuífero de Motril-Salobreña generará una modificación en el laboreo agrícola, ya sea en el marco de la situación media anual actual como en los escenarios estudiados resultantes de la construcción de la presa.

### MODELO NUMÉRICO DEL ACUÍFERO

Se aplicó el código en diferencias finitas MODFLOW, en la versión integrada en el paquete Visual MODFLOW v. 2.81 (WHI, 1999). El modelo es tridimensional y se calibró en régimen transitorio para el año hidrológico medio del período 1982/98. Los criterios de calibración fueron: ajuste por Mínimos Cuadrados sobre los datos piezométricos y coherencia de los parámetros y del balance hídrico resultantes con el conocimiento del sistema. Los datos se trataron con el sistema de información geográfica Idrisi (Eastman, 1997).

La información corresponde a un período -1982/1998- relativamente extenso. Sin embargo, la distribución temporal de los datos presenta tal heterogeneidad que no permite una calibración consistente si se pretende modelizar dicho período. Debido a ello, se opta por definir un modelo para el año medio respectivo, pues ofrece una mayor robustez al calibrar. A continuación, se realiza una descripción sucinta del modelo, para mayores detalles acerca de la identificación de parámetros, calidad del ajuste alcanzado, análisis de sensibilidad o redefiniciones conceptuales, entre otros aspectos, se puede consultar el documento IGME (2000).

Los eventuales problemas de intrusión marina de los escenarios modelados se analizan mediante el Balance Hídrico, identificando y cuantificando el volumen de agua salada que intruye al acuífero. Esta no es la técnica más idónea de estudio, sin embargo ofrece una primera aproximación de este fenómeno. En este ámbito geográfico se realizaron numerosos modelos que usaron este recurso (García-Aróstegui, 1998, Padilla *et al.*, 1997, Calvache y Pulido-Bosh., 1996 y 1994, Calvache, 1991). La representación numérica adecuada de la intrusión marina requiere el desarrollo de

modelos de densidad variable o, eventualmente, de interfase neta.

### Geometría del acuífero y discretización espacial

El acuífero posee una extensión de 47 km<sup>2</sup> y se discretiza mediante un modelo tridimensional que incluye tres capas de espesor variable que se corresponden a los niveles acuíferos superficial y profundo y al acuitardo. Cada capa se encuentra compuesta por 1189 celdas activas cuadradas de 200 m de lado. Los mayores espesores se sitúan en la desembocadura del río Guadalfeo donde se superan los 220 m, para evitar capas muy someras se impone al modelo un espesor total mínimo de 10 m. Los intervalos de cálculo fueron de cinco días, acorde a la discretización de la información de recarga.

### Piezometría

Los datos piezométricos proceden de las bases de datos del IGME y la Confederación Hidrográfica del Sur de España, CHSE. Para la calibración, se seleccionan 48 puntos de observación, calculándose 174 niveles medios estacionales para el período 1982/1998. En la Figura 2 se exponen los ajustes obtenidos. La piezometría inicial es la media anual.

Los niveles reciben la influencia estabilizadora del río Guadalfeo. La mayor parte del acuífero se encuentra por debajo de la isopieza de 10 m, con gradientes muy bajos y pocos cambios estacionales. Existe un resalte notorio en las isopiezas en el contacto del acuífero y los piedemontes orientales. La zona al Este de la rambla de Las Brujas se halla libre de la influencia del río Guadalfeo y allí, entre las isopiezas 2.5 m y 15 m, es donde la evolución estacional es más notoria. Al Oeste de dicha rambla, el río Guadalfeo y las entradas de las descargas del acuífero de Escalate y de la rambla de Molvizar, dan gran estabilidad a la piezometría. En este sector, a grandes rasgos, no se aprecia evolución estacional, exceptuando si se consideran como evolución estacional singular, las depresiones generadas por los bombeos estivales. La más importante se sitúa en la afluencia de la rambla de Molvizar al Guadalfeo y la causan los bombeos de la Papelera del Mediterráneo, el abastecimiento a Salobreña y diversos pozos agrícolas. Se desarrolla en verano y alcanza un radio de influencia de 250 m y una depresión de 10 m. El otro gran cono de bombeo es más somero pero más persistente en el tiempo, se sitúa al Oeste de Salobreña. Se desarrolla al comenzar el invierno y alcanza un radio de influencia de 100 m y una profundidad de 3 m.

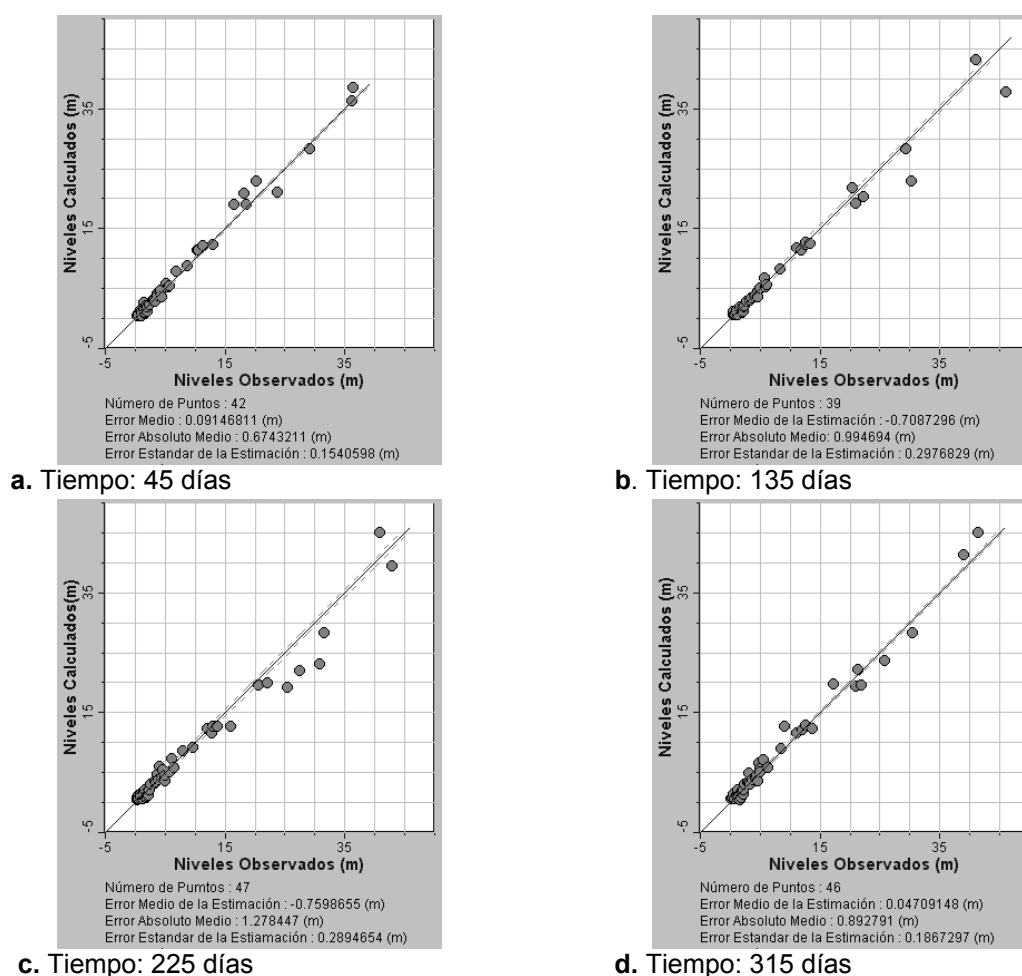
### Parámetros hidrogeológicos

El acuífero está constituido, en su mayor parte, por material aluvial y piedemontes, el sustrato lo conforman metapelitas de baja permeabilidad. En el sudoeste afloran materiales carbonáticos triásicos muy permeables, con continuidad hidráulica con el acuífero aluvial (Figura 1). En la desembocadura del río Guadalfeo, existen indicios de la presencia de un nivel detrítico semiconfinado.

Los datos de permeabilidad,  $k$ , proceden de ensayos de bombeo recabados por el IGME, la CHSE e investigadores universitarios (Castillo, 1975). El valor más alto de permeabilidad, 1182 m/d, se sitúa en el Norte del acuífero, vecino al río Guadalfeo. La  $k$ , disminuye aguas abajo, en

la desembocadura del río varía entre 30 m/d y 50 m/d. En el extremo occidental de la plana costera se alcanzan valores de  $k$  de 850 m/d, en su sector central son de 35 m/d -rambla de Los Alamos- y en su extremo oriental de 20 m/d -rambla del Puntalón-. En líneas generales, se considera que  $k$  tiende a decrecer de Oeste a Este y de Norte a Sur.

La porosidad se estimó con geofísica -8 a 20%- y el coeficiente de almacenamiento,  $S$ , se consideró que oscilaba entre el 5 y el 10% (Castillo, 1975). Estudios posteriores del IGME y la CHSE aportan valores de  $S$  más elevados -22% en un ensayo de bombeo en el Norte del acuífero-. Soto (1998) estima a  $S$  entre el 6 y el 20%.



**Figura 2.** Calibración del modelo: niveles medidos vs. Calculados, en los tiempos de observación

Inicialmente se definieron 6 zonas de  $k$  y  $S$  (Tabla 1), procurando representar tanto la variación en sentido Este-Oeste observada en los datos de  $k$ , como la evolución que se supone tendrían  $k$  y  $S$  ante la presencia de un acuitardo y el respectivo nivel semiconfinado. Los resultados, al calibrar (Tabla 1), ofrecen zonificaciones de  $k$  y  $S$  más robustas que las definidas inicialmente. Así, para  $k$  se reconocen tres ambientes: los piedemontes -el más

permeable-; la plana costera y los afloramientos calizos -con permeabilidad alta e isotropa-. En cuanto a  $S$ , sí se detecta una evolución en profundidad en la plana costera, aunque más leve que la propuesta.

La robustez de la conceptualización resultante, en gran medida se debe a la sensibilidad de los datos piezométricos que sustentan al modelo, pues no permiten definir ni esquemas de mayor detalle, ni valoraciones de

parámetros más matizadas. Además, los datos responden a una situación media –en rigor, ficticia- y su definición implica simplificaciones que conllevan una merma en la sensibilidad de los datos para evaluar consistentemente la

evolución espacial de  $k$  y  $S$ . La escasez de datos sobre estos parámetros y su distribución heterogénea en el dominio contribuyen también a estos resultados.

ZONA	$K_x$ (m/s)	$k_y$ (m/s)	$K_z$ (m/s)	$S$
1: Piedemontes	5. E-4	5. E-4	5. E-4	0.15
2: Acuífero libre: Sector Oeste	1. E-4	1. E-4	1. E-8	0.20
3: Acuífero libre: Sector Este	1. E-4	1. E-4	1. E-8	0.20
4: Acuífero semiconfinado	1. E-4	1. E-4	1. E-8	0.01
5: Acuitardo	1. E-4	1. E-4	1. E-8	0.01
6: Afloramientos calizos	1. E-4	1. E-4	1. E-4	0.10

**Tabla 1.** Calibración del Modelo: Permeabilidades,  $k$ , y Coeficiente de Amacenamiento,  $S$

Las permeabilidades resultantes de la calibración se caracterizan por ser un orden de magnitud menor a las determinadas en las pruebas de campo, presentando una tendencia inversa al efecto de escala que puede afectar a la calibración de este parámetro, según han observado algunos investigadores (Sánchez et al, 1996). Esta reducción en un orden de magnitud de la valoración en campo de la permeabilidad puede deberse a que, en general, los ensayos de bombeo se ejecutaron en la vecindad de cauces superficiales, donde las permeabilidades suelen ser superiores a los valores medios del acuífero -por la mayor conductividad hidráulica de los materiales aluviales en las inmediaciones de ríos y ramblas-, mientras que los parámetros del modelo representan las condiciones hidrogeológicas medias en la zonificación del modelo.

#### **Recursos hídricos del acuífero**

Estudios previos, realizados por el IGME, la CHSE e investigadores universitarios (Castillo, 1975), estiman los recursos del sistema entre 47 y 60  $\text{hm}^3/\text{a}$ . El modelo evalúa los recursos renovables medios en 33  $\text{hm}^3/\text{a}$ .

#### **Recarga por percolación de agua de lluvia y retornos de regadíos**

La recarga difusa, o directa, estuvo sujeta a calibración y en una primera aproximación para su evaluación se utilizó el código Visual BALAN v.1 (Samper et al. 1999). Este trata de forma conjunta la precipitación y los retornos de regadíos, aplica distintos métodos de cálculos de ETP, ETR, escorrentía superficial y otros factores -intercepción, encharcamiento- que inciden en la recarga. Las fuentes de información fueron el Instituto Nacional de Meteorología, la Cámara Agraria Provincial de Granada, Castillo (1975), la CHSE y el IGME.

Los datos meteorológicos proceden de las estaciones termopluviométricas de Salobreña y

Motril para el período 1982-1998. La zonificación de recarga se definió identificando el uso de suelo que se desarrolla y zona de influencia de cada estación termopluviométrica. Así, se asoció a cada “tipo” de dotación unas condiciones meteorológicas dadas, definiéndose en el modelo ocho zonas de recarga difusa (Figura 3 y Tabla 2).

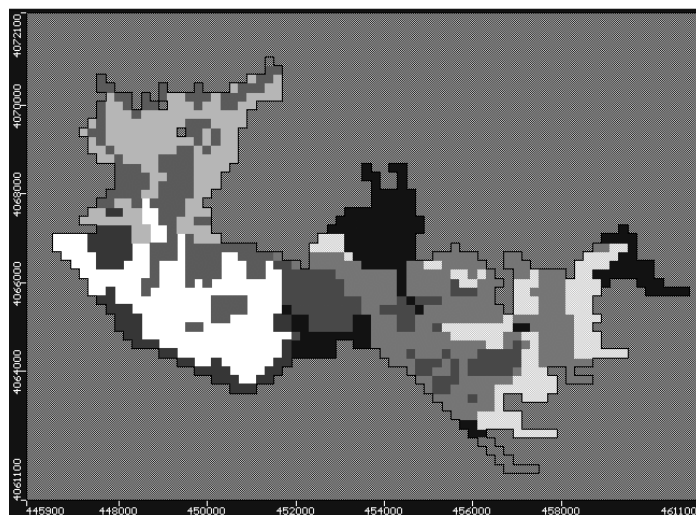
Esta recarga representa el 51% (16.76  $\text{hm}^3$ ) de la recarga media anual del acuífero. La disparidad de resultados entre las zonas de huerta se debe a que en la zona de influencia de Motril esta recarga engloba a áreas de cultivo bajo invernadero -donde el riego se realiza con goteo y dotaciones más bajas- mientras que en la zona de Salobreña no sólo no existen invernaderos, sino que el riego de la huerta se realiza mayormente por gravedad. Asimismo, en la zona de Salobreña “sin uso agrícola” existen huertas familiares regadas por gravedad

#### **Relación acuífero-aguas superficiales**

La red hidrográfica la componen: el río Guadalfeo y las ramblas de Molvízar, El Puntalón, Los Álamos, Las Brujas y Villanueva (Figura 1). La relación de esta red con el acuífero se representa con la condición de contorno río-acuífero, basada en los parámetros: conectividad hidráulica y cotas de lecho de río y de nivel de agua en el mismo. La recarga de carácter concentrado procede casi enteramente de los excedentes superficiales del azud del Vínculo y se sitúa mayoritariamente en el tramo del Guadalfeo entre el azud y la rambla de Molvízar, inducida por los fuertes bombeos en sus márgenes. Esta recarga se valora en 8.5  $\text{hm}^3/\text{a}$  y representa el 26 % de la recarga total media anual del acuífero. La descarga a los cursos de agua superficiales -1.7  $\text{hm}^3$ - es el 5% de la descarga total media anual y se sitúa en los tramos bajos del Guadalfeo. Ambas evaluaciones son coherentes con la información previa.

Estudios previos, realizados por el IGME, la CHSE e investigadores universitarios (Castillo, 1975), estiman la descarga de los manantiales entre 5 y 10 hm<sup>3</sup>/a y lo hacen sin base de cálculo o aforo alguno ni consideran los mismos manantiales. El modelo representa sólo a los manantiales situados al pie del afloramiento carbonático de Salobreña con la condición de contorno de dren, cuyos parámetros: son la cota de desborde y conectividad hidráulica. Se valora

esta descarga en 1.84 hm<sup>3</sup>/a, que es el 5% de la descarga total media anual. Su caudal a lo largo del año es muy regular, en torno a 58 l/s. Las surgencias en la línea de costa son difusas y su caudal es de difícil aforo por su escasa entidad. Por ello, al no poderse contrastar su evaluación, se obvia su representación numérica y se asume que toda descarga en la costa se incluye en la salida subterránea al mar.



LEYENDA:

Estación meteorológica	Uso del suelo	
Salobreña (Vega del Guadalfeo)	caña de azúcar	
	cultivos subtropicales	
	huerta	
	sin uso agrícola	
Motril (casco urbano)	caña de azúcar	
	cultivos subtropicales	
	huerta	
	sin uso agrícola	

**Figura 3.** Zonificación de la recarga superficial. Las coordenadas escritas en los márgenes son UTM

Estación meteorológica	Uso del suelo	Precip. (mm/a)	Dotación (mm/a)	ETP (mm/a)	ETR (mm/a)	Esc.Sup. (mm/a)	Recarga V.Balan (mm/a)	Recarga Modelo (mm/a)
Salobreña (Vega del Guadalfeo)	Caña de azúcar	377	1650.	937.	821	88	1010	505
	Cultivos Subtropicales		850.		901	86	188	383
	Huerta		1030.		696	73	584	584
	Sin uso agrícola		0		55	17	204	204
Motril (casco urbano)	Caña de azúcar	373	1650.	926	817	17	1078	539
	Cultivos Subtropicales		850.		115	38	960	396
	Huerta		1030.		633	17	202	218
	Sin uso agrícola		0		137	117	56	56

**Tabla 2.** Resultados de los modelos de Balance Hídrico para el año medio del período 1982-1998

#### **Entradas subterráneas por el aluvial del río Guadalfeo, bajo el azud del Vínculo**

La CHSE y el IGME valoraron esta entrada entre 30 y 15.5 hm<sup>3</sup>/a, se basaron, en algún caso, en campañas de aforos diferenciales y, en otros, en estimaciones previas no contrastadas. La CHSE recoge en el Plan Hidrológico de la Cuenca Sur de estas valoraciones.

En las tareas de premodelización se evaluó esta entrada en una sección bien definida situada aguas abajo del Vínculo, se utilizaron

datos de la CHSE y de la Junta de Andalucía. Se obtuvo una aportación de 3 hm<sup>3</sup>/a, cifra muy inferior a la dada en los estudios previos. La calibración del modelo valida este cálculo, en el que se representó con una condición de contorno de caudal fijo e inicialmente se adoptó un valor de 15 hm<sup>3</sup>/a. El valor resultante -3 hm<sup>3</sup>/a- es un 9 % de la recarga total media anual.

### **Otras entradas laterales**

La entrada de borde por escorrentía superficial se restringe a las cuencas de las ramblas de Molvizar y El Puntalón. Las acequias perimetrales al acuífero capturan estas aguas y las vierten a los cauces de las ramblas. En el dominio del modelo, El Puntalón tiene el cauce revestido, por lo que se desprecia su aportación. La rambla de Molvizar al no tener el cauce revestido, se representa como condición de caudal fijo de  $0.5 \text{ hm}^3/\text{a}$ .

La aportación lateral procedente del acuífero de Escalate en su contacto con el piedemonte de Molvizar, fue evaluada tanto por el IGME como por investigadores universitarios (Castillo, 1975) en  $6 \text{ hm}^3/\text{a}$  y, por la CHSE, en  $3 \text{ hm}^3/\text{a}$ . En algún estudio del IGME ni siquiera se consideró. En el modelo se representa, en su límite Norte, con una condición de caudal fijo de  $4 \text{ hm}^3/\text{a}$ .

### **Explotación por bombeo**

El modelo representa las explotaciones en un año medio, a partir de los controles sistemáticos realizados por el IGME entre los años hidrológicos 1985/86 y 1991/92. Se revisaron las explotaciones y eliminaron captaciones de régimen irregular no representativas del año medio. La extracción total es de  $15.37 \text{ hm}^3/\text{a}$ .

### **Descargas al mar**

El IGME e investigadores universitarios (Castillo, 1975; Pulido y Rubio, 1988) estimaron estas descargas subterráneas entre 22 y  $45 \text{ hm}^3/\text{a}$ . Estas valoraciones se basaron en cálculos a partir de los gradientes piezométricos o en cierre de balance hídrico. En el modelo la descarga al mar se representa con la condición de contorno de nivel fijo ( $H=0 \text{ m}$ ) y se valora en  $17 \text{ hm}^3/\text{a}$ , que es el 47% de la descarga total anual media del acuífero.

El modelo evidenció una pequeña entrada por intrusión a partir de fines del invierno, causada por el bombeo de pozos someros situados en la costa, cercanos a Salobreña,  $695 \text{ m}^3/\text{a}$ .

### **Rasgos a destacar del balance hídrico del modelo**

El balance hídrico evidencia la gran influencia de la actividad humana sobre el sistema, destacando:

La recarga difusa tiene su origen mayoritario en el retorno de riego y su evolución temporal la condiciona el régimen de aplicación. El acuífero incrementa notablemente sus recursos al ser, en general, el agua de regadío de origen superficial y externo al sistema.

La recarga desde el río al acuífero la propicia la acción de los bombeos y se circunscribe al tramo del Guadalfeo entre el azud del Vínculo y la rambla de Molvizar.

La descarga al mar presenta una evolución temporal acorde a la evolución de la recarga y, por lo tanto, al régimen de riego.

El funcionamiento del sistema dado por el modelo es análogo a los propuestos en estudios precedentes, pero difiere de estos al valorar la entrada por el aluvial del Guadalfeo en  $3 \text{ hm}^3$ , que es mucho menor a las dadas anteriormente. Por ello, al comparar estos resultados con esas evaluaciones previas, los recursos del acuífero y su descarga al mar se reducen en el orden dado por la diferencia al valorar esta entrada.

## **SIMULACIONES**

### **Simulaciones previas**

El futuro embalse de Rules pretende asegurar el abastecimiento de la costa granadina y ampliar los regadíos. Independientemente de las reglas de operación a adoptar en una futura gestión conjunta de los recursos de la cuenca del río Guadalfeo, la presa incidirá sobre el acuífero ocasionando:

La desaparición, o una fuerte disminución, del flujo circulante por el aluvial del río aguas abajo de la presa, eliminaría la entrada en el acuífero de  $3 \text{ hm}^3/\text{a}$ .

El caudal mínimo circulante aguas abajo de la presa será el ecológico de diseño, Aportación =  $9.1 \text{ hm}^3/\text{a}$ . Las características del lecho del río Guadalfeo y las explotaciones existentes en sus márgenes, permiten suponer que este caudal conformará la recarga inducida del acuífero.

La consideración de estos dos efectos lleva a la simulación de dos hipótesis (IGME, 2000):

**Hipótesis I:** no existe entrada al acuífero por el aluvial del río Guadalfeo, pero circula por el mismo un caudal igual al del año medio. El excedente medio anual vertido por el azud del Vínculo es  $63.48 \text{ hm}^3$  (período: 1972/73-97/98)

**Hipótesis II:** no existe entrada al acuífero por el aluvial del río, pero circula por el cauce el caudal ecológico. La baja del caudal circulante por el cauce se representa mediante la pertinente reducción de la carga hidráulica en la condición de contorno del río Guadalfeo. Esta hipótesis es la más desfavorable.

El referente para el análisis de las simulaciones es la calibración, pues representa al año medio (período 1982/89) de la situación existente previa a la construcción de la presa. Ambas simulaciones sólo comprenden un año, el siguiente a la puesta en operación del embalse, que es un año de transición hacia un nuevo

equilibrio del acuífero. En rigor, no se simulan los nuevos escenarios que se alcanzarán, pero se pueden establecer hipótesis verosímiles sobre estos nuevos escenarios de equilibrio.

En la **Hipótesis I**, durante el primer año de transición, no se aprecia evolución alguna de la piezometría y la disminución de las descargas es apenas perceptible, no se acusa la reducción de las entradas al acuífero, debido en parte a la descarga de los recursos almacenados. En algunos tramos se incrementa la recarga procedente del río Guadalfeo por el leve descenso de los piezometría en sus inmediaciones, ello hace que la reducción en las descargas globales sea algo menor al volumen de la entrada anulada. La perspectiva futura es que el abatimiento final de la piezometría no sea relevante y la reducción en las descargas algo menor a la entrada anulada.

En la **Hipótesis II**, durante el primer año de transición se aprecia un abatimiento decímetro de la piezometría en las inmediaciones del Guadalfeo, debido a la reducción de la carga hidráulica del río. A diferencia de la Hipótesis I, en esta, todos los elementos del balance hídrico que presentan una variación respecto a la situación media, acusan esta desde el inicio de la simulación. El balance muestra respecto al del año medio: una ligera disminución en las entradas (15%) -se anula la entrada por el aluvial del río y disminuye la recarga inducida por el menor caudal circulante-; un leve incremento de la descarga al Guadalfeo -al aumentar el gradiente de descarga al río por disminuir la carga hidráulica- y una reducción irrelevante en la descarga al mar y por manantiales -debido al drenaje de los recursos almacenados-. A largo plazo, se estima probable que las salidas al mar y por manantiales decrezcan acorde a la merma de las entradas y, respecto a la relación con el río, es que la reducción de su carga hidráulica genere un ligero abatimiento en la piezometría, hasta alcanzar el gradiente hacia el río una nueva situación de equilibrio, con un valor mayor al del gradiente de la situación histórica media, pero menor al simulado -de transición-.

Las características del sistema hace suponer que ninguna hipótesis propicia por sí misma un incremento de la intrusión marina.

### Simulaciones realizadas

En pos de responder al objetivo del trabajo se ejecutan seis simulaciones. Estas representan a la situación media anual calibrada y a las Hipótesis I y II, con un horizonte de diez años y bajo dos condiciones de recarga difusa distintas.

En un caso, la recarga responde al uso actual del suelo y su zonificación respectiva (Figura 3). Estrictamente, estas simulaciones se

corresponden con las realizadas previamente (IGME, 2000), pero extendiendo el período de estudio a diez años. Las restantes simulaciones se realizan para una recarga difusa definida al extender a todas las zonas bajo labor agrícola, las condiciones de recarga de la zona hortícola que se encuentra bajo las condiciones meteorológicas de Motril. Esta zona incluye cultivos bajo invernadero, donde el riego se realiza por goteo y con dotaciones más bajas, su retorno es mucho menor a las de otros usos agrícolas. Estas nuevas condiciones generan una reducción respecto a la situación actual de un 46 % de la recarga difusa y de un 20% de la recarga total anual. La nueva recarga definida será referida como "recarga modificada".

El primer escenario de recarga representa la continuidad futura de la actividad agrícola bajo las condiciones actuales. Estas simulaciones tienen dos objetivos: contrastar la prognosis sobre la evolución del sistema realizada con las simulaciones previas (IGME, 2000) y ofrecer un referente para analizar los resultados de las simulaciones bajo las nuevas condiciones de recarga. El nuevo escenario de recarga representa la modificación de la actividad agrícola debido a la sustitución de unos cultivos por otros actualmente más rentables y al empleo de técnicas de riego que impliquen mayor economía hídrica. Estas simulaciones procuran evaluar el impacto que sobre el acuífero tendrían nuevas prácticas agrícolas para la situación media actual y para las hipótesis hechas sobre la presa de Rules.

El período de estudio de diez años se adopta al considerar una difusividad hidráulica media del acuífero de  $1.45 \times 10^{-4} \text{ d/m}^2$  y una dimensión media de 4500 m. Se estima que el sistema se encontrará estabilizado al finalizar el período. Las piezometrías y balances hídricos se analizan el día 3575 de las simulaciones. Este día es el 290 del décimo año hidrológico: mediados de Julio, inicio de los grandes riegos estivales y cuando la recarga es menor.

El contraste entre la simulación de la situación media y las Hipótesis I y II, bajo las condiciones de recarga actual, permiten validar la prognosis hecha en el estudio previo del IGME (2000). En el décimo año, la Hipótesis II -la más desfavorable- respecto a la situación media no acusa un proceso de intrusión marina particular y la piezometría sólo sufre un ligero abatimiento en las inmediaciones del río Guadalfeo, que no alcanza los 50 cm en su punto máximo -la confluencia con la rambla de Molvizar-. Debido a este leve abatimiento de la piezometría en la cercanía del río, se incrementa ligeramente la recarga procedente de este y disminuye la descarga al mismo. Igualmente, disminuye la descarga al mar. En el caso de la recarga



modificada, un contraste similar -Hipótesis II frente a situación media- ofrece resultados análogos. Se observa que el abatimiento de niveles tiene una mayor repercusión espacial, al extenderse desde Salobreña a la rambla de Las Brujas, y superar levemente su amplitud máxima los 50 cm, en la confluencia Guadalfeo-Molvizar.

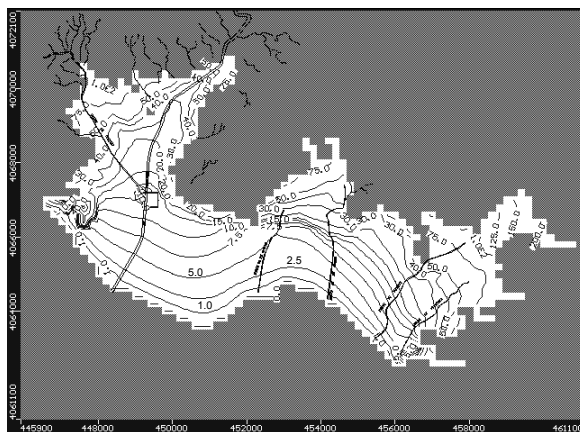
Frente al escaso impacto que sobre el acuífero tienen las hipótesis que representan la influencia de la presa de Rules, destaca la notable incidencia que tendría un cambio en la actividad agrícola. Dada la poca variación que producen las hipótesis, ambos casos de recarga se contrastan en el décimo año de sus respectivas situaciones medias (Figura 4). Se revisan piezometrías y balances hídricos, se toma de referente a la condición actual de recarga.

En el caso de la recarga actual, la evolución piezométrica al Oeste de la rambla de Las Brujas se estabiliza en el sexto año y, al Este, en el noveno. Para la recarga modificada, al Oeste del Guadalfeo, los niveles se estabilizan en el quinto año y, al Este del río, a partir del octavo año la variación es escasa.

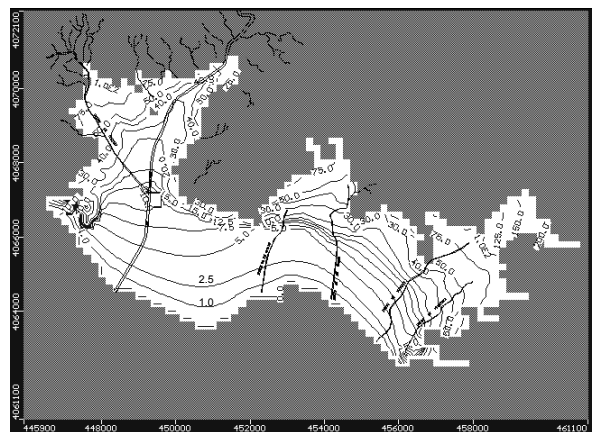
Bajo la recarga modificada, al Oeste de la rambla de Las Brujas, los niveles superiores a 15-20 m no varían, pero en el sector de la plana costera sufren un abatimiento que alcanza los 2.5 m en un área extensa. Entre las ramblas de Las Brujas y Los Álamos -centro del acuífero-,

los niveles mayores a 10-7.5 m no cambian y en la plana costera los descensos llegan a los 2.5 m, aunque en general se hallan entre 1 y 0.5m. Al Este de Los Álamos, los niveles superiores a 20-30 m no sufren grandes variaciones, mientras que en la plana costera los descensos alcanzan los 5 m en la zona del Puntalón. Así, un cambio en la actividad agrícola como el simulado no alteraría en demasía la piezometría en los piedemontes ni en la zona alta del acuífero. Sin embargo, en la plana costera -la zona más extensa del acuífero- los descensos de niveles alcanzarían los 5 m y la mayor parte superaría los 2.5m. Ello de mantenerse las actuales condiciones de bombeo.

Ante la nueva situación de recarga, la intrusión marina tiene un incremento porcentual leve (2-3%), y se mantiene en órdenes insignificantes de balance. Debido al descenso general de niveles en la plana, la relación acuífero-aguas superficiales se ve alterada en particular, pues la descarga a los cursos de agua, si bien marginal en términos absolutos, acusa una notable disminución porcentual (20%) y la recarga procedente de los ríos aunque tiene un incremento porcentual bajo (3%), es conceptualmente relevante por extenderse a todos los cursos de agua en la plana. La descarga al mar se reduce en más de un 10%, mientras que la de los manantiales del afloramiento calizo de Salobreña no varía.



a- Recarga actual (Situación media)



b- Recarga modificada (situación media)

**Figura 4:** Resultados de las simulaciones: piezometrías a mediados del mes de Julio del décimo año hidrológico

## CONCLUSIONES

En el presente trabajo se realizan simulaciones a diez años para representar, tanto de forma conjunta como por separado, una reducción del retorno de riego y dos efectos ciertos de la presa de Rules -la eliminación del flujo circulante por su aluvial en la entrada de este al acuífero y la reducción del caudal circulante por el río de su valor medio al ecológico-. Las simulaciones permiten predecir

escasos cambios en el acuífero respecto a la situación media si se consideran exclusivamente los efectos de la presa de Rules. Sin embargo, la modificación de la actividad agrícola -tipo de cultivo, técnica de riego- incidiría de forma trascendente sobre el sistema, produciendo un descenso notorio y generalizado en los niveles en la plana costera, la zona más extensa, productiva y sensible a la intrusión marina del acuífero. Respecto a la intrusión, ninguno de los

escenarios simulados propicia la ocurrencia del mismo.

A pesar de la claridad e interés que presentan los resultados de las simulaciones, se deben tener en cuenta sus limitaciones e incertidumbres para una interpretación correcta de los resultados. Así, se señala el carácter estrictamente “irreal” que tiene la representación de una situación estadísticamente media, “la simplificación” empleada para definir los efectos de la presa de Rules y el “carácter hipotético” de los cambios simulados en la actividad agrícola, aunque su definición procura reflejar las tendencias del mercado y la planificación del riego -dos factores que influyen sobre esta actuación-. La recarga al acuífero por el aluvial del Guadalfeo -3 hm<sup>3</sup>/a- se caracterizó de forma consistente tanto en el modelo conceptual como en el numérico. Por ello, este resultado invita a revisar la conceptualización realizada hasta el momento de esta entrada, al ser su valoración mucho menor que en los estudios previos y dada su importancia en el sistema acuífero.

El escaso impacto evidenciado por las simulaciones que tendría sobre el acuífero la construcción de la presa de Rules, reside en las particularidades del modelo conceptual que se validó numéricamente. Estas son las siguientes:

- la entrada por el aluvial del Guadalfeo, 3 hm<sup>3</sup>/a, -anulada en ambas hipótesis- representa sólo el 9% de la recarga media anual, 33 hm<sup>3</sup>/a.
- el caudal ecológico, 9.1 hm<sup>3</sup>/a, -restricción en la Hipótesis II- permite satisfacer la recarga inducida procedente del río, 8.5 hm<sup>3</sup>/a.

No obstante, los resultados muestran con claridad a la actividad humana como un factor histórico esencial para los recursos del acuífero.

Las mayores entradas del sistema son el retorno de riego, 51%, y la recarga inducida por bombeo en las márgenes del Guadalfeo, 26%. Esta última muestra cómo la explotación de las aguas subterráneas puede acrecentar la recarga de los acuíferos, aumentando así los recursos renovables (Cruces *et al.*, 1998; Llamas *et al.*, 1999, Llamas, 2000).

En cuanto al retorno de riego, se debe contemplar que el Plan Hidrológico de la Cuenca Sur, el Plan Nacional de Regadíos y los proyectos de la presa de Rules y de gestión de los recursos regulados alientan a aplicar sistemas de riego que propicien el ahorro de recursos hídricos. Asimismo, los cultivos bajo invernadero -más rentables en términos de mercado- demandan dotaciones mucho menores a las aplicadas en los cultivos tradicionales. Estas actuaciones que usualmente desde el punto de vista de la gestión hídrica se consideran *a priori* positivas, en este sistema deberían, por lo menos, ser revisadas en detalle. Ello es debido a su posible repercusión negativa en una merma significativa de la recarga y, con ello, de los recursos del acuífero. Situaciones análogas a esta se producen en otros acuíferos de España, como en el caso del delta del río Llobregat (Custodio, 1997)

Finalmente, los resultados invitan a reflexionar sobre la necesidad de estudiar no sólo el impacto hidrológico directo que sobre un acuífero pueden producir las obras de infraestructura hidráulica, sino también el impacto que puede generar la gestión de los recursos que se planifica a partir de dichas obras.

## REFERENCIAS

- CALVACHE M y PULIDO-BOSH A. 1996. Condicionantes sobre la intrusión marina en acuíferos detríticos: Ejemplos de la costa sur mediterránea. (Salt water intusion factors in detrital aquifer: Examples of the mediterranean south coastal). **En:** IV Simposium del Agua en Andalucía, 239-248.
- CALVACHE ML y PULIDO-BOSH A. 1994. Modelling the effects of salt water intrusion dynamics for coastal karstified block connected to a detrital aquifer. *Ground Water*, 32(5), 767-777.
- CALVACHE ML. 1991. Simulación matemática del contacto agua dulce-agua salada en acuíferos de la Costa del Sol (Mathematical simulation of sea-fresh water interface in aquifer of the Costa del sol). Tesis Doctoral, Universidad de Granada.
- CASTILLO E. 1975. Hidrogeología de la vega de Motril-Salobreña y sus bordes. (Hydrogeology of the Motril-Salobreña plain and its border). Tesis de Licenciatura. Universidad de Granada.
- CRUCES DE ABIA J, FORNES J, CASADO M, HERA A DE LA, LLAMAS MR y MARTÍNEZ L. 1998. El marco natural, agua y ecología (The natural frame, water and ecology). **En:** Cruces *et al.* (eds.) *De la Noria a la Bomba. Conflictos sociales y ambientales en la cuenca alta del río Guadiana*. Ed. Bakeaz,, 17-130.
- CUSTODIO E. (1997). Comentario y discusiones: Temas 6 a 10. (Coments and discussions: Themes 6 to 10). **En:** Custodio, Llamas y Samper (Eds.) *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la Planificación Hidrológica*, AIH-ITGE, 251-256
- EASTMAN R. (1997). Idrisi v.1. Clark Labs for Cartographic Technology and Geographic Analysis. Clark University. Worcester, Mass. USA.

- GARCÍA-ARÓSTEGUI JL. 1998. Estudio hidrogeológico y modelización de los acuíferos de los ríos Vélez y Benamargosa. ( Hydrogeologic studies and models of the Vélez and Benamargosa rivers aquifers). Tesis Doctoral, Univ. de Granada.
- IGME. 2000. Actualización del conocimiento hidrogeológico de la U. H. 06.21 Motril-Salobreña y modelo matemático del acuífero (Hydrogeologic studies and mathematical model of U.H. 06.21 Motril- Salobreña). Documento 15.1: Memoria. Documento 15.2: Anexos.
- LLAMAS MR, HERNÁNDEZ N y MARTÍNEZ L. 1999. El uso sostenible del agua subterránea (Goundwater sustained use). *Hidropress*, 19 (6), 18-28.
- LLAMAS MR. 2000. Mitos y realidades sobre la crisis del agua en España (Myths and realities about the water crisis in Spain). *Hidropress*, 23 (3), 11-17.
- PADILLA F, BENAVENTE J y CRUZ J. 1997. Simulación de diferentes alternativas de gestión de los recursos hídricos del acuífero del río Verde (Simulations of the different alternatives about water resources manegement in the Rio Verde aquifer). *Estudios Geológicos*, 53 (3-4), 173-182.
- PULIDO A y RUBIO JC. 1988. Los acuíferos costeros de Motril-Salobreña y Carchuna. (The Motril-Salobreña and Carchuna coastal aquifers). TIAC' 88. Vol. II, Los acuíferos costeros de Andalucía Oriental, 209-238
- SAMPER J, HUGUET LL, ARES J y GARCÍA VERA MA. 1999. Manual del usuario del programa Visual BALAN v.1.0. (User's manual for the Visual BALAN v.1.0) ENRESA (ed.), Pub. Téc. nº 05/99.
- SÁNCHEZ X, CARRERA J y GIRARDI J. 1996. Scale of effects in transmissivity. *J. of Hydrology*, 183,(1-22).
- SOTO JM. 1998. Aportaciones al conocimiento del acuífero detrítico de Motril-Salobreña (Granada). (The Motril-Salobreña detrital aquifer) Tesis de Licenciatura. Universidad de Granada.
- WATERLOO HYDROGEOLOGIC Inc. 1999. User's manual for Visual MODFLOW. Waterloo, Canada. 282 pp.