

# El balance hídrico del acuífero Motril-Salobreña: Estudios previos y cálculo mediante modelación numérica

*Motril-Salobreña aquifer water balance: Previous studies and estimation by numerical modelling*

Carlos Duque y María Luisa Calvache

Facultad de Ciencias. Universidad de Granada. Av/ Fuentenueva s/n, 18071, Granada. cduque@ugr.es; calvache@ugr.es

## ABSTRACT

*Motril-Salobreña aquifer has been exhaustively monitored from 2001 to 2007 and with the new data a flow model with MODFLOW was developed. The water balance has been established for each one of the last 6 years. During this time several important changes happened in the aquifer associated with the anthropic activity. The analysis of the new water balance and the comparison with the older ones carried out by different researchers allow us to quantify the main recharges sources to the aquifer and the impact of the modifications in the natural system due to the human actions.*

**Key words:** *Motril-Salobreña aquifer, water balance, anthropic changes, dam, flow model.*

*Geogaceta, 48 (2010), 119-122  
ISSN: 0213-683X*

*Fecha de recepción: 15 de febrero de 2010  
Fecha de revisión: 21 de abril de 2010  
Fecha de aceptación: 28 de mayo de 2010*

## Introducción

El acuífero Motril-Salobreña presenta unas excepcionales condiciones hídricas tanto en lo que se refiere a la calidad de sus aguas como a la cantidad (Calvache *et al.*, 2003). Las causas de estas circunstancias tan poco frecuentes en el suroeste español se relacionan con la aportación del río Guadalfeo que drena la cara sur de Sierra Nevada y los sistemas de regadío implantados desde los tiempos de los árabes mediante inundación. Sin embargo durante los últimos años, modificaciones antrópicas como la reciente construcción de la presa de Rules (que interrumpe el flujo del río Guadalfeo), cambios en los usos del suelo y en las técnicas agrícolas (proliferación de invernaderos frente a los cultivos tradicionales) están provocando la modificación en las fuentes de recarga del acuífero. En este trabajo se presenta un resumen de los balances que han obtenido distintos autores desde los años 70 hasta la actualidad mediante estudios puntuales. Para los últimos años (2001-2007), en los que han acontecido los principales cambios antrópicos, se ha monitorizado el acuífero exhaustivamente y se han obtenido los balances hídricos mediante un modelo numérico de flujo (Duque, 2009). La comparación de los resultados obtenidos con los estudios previos permite una

cuantificación más precisa de las fuentes de recarga y descarga del acuífero. Los balances obtenidos mediante el modelo de flujo, al tratarse de años consecutivos y mediante la misma metodología de estudio permiten observar las diferencias entre años secos y húmedos y el impacto de las acciones antrópicas en el funcionamiento del sistema hidrogeológico.

## Contexto hidrogeológico

El acuífero costero Motril-Salobreña está formado por materiales detríticos arrastrados por los ríos que desembocan en el Mediterráneo encontrándose sedimentos tanto de medios fluviales como deltaicos. Se encuentra en una zona donde el clima se clasifica como semiárido y en el que destaca la presencia del río Guadalfeo, que tiene un caudal relativamente elevado (el caudal medio es 7700 L/s) debido a una amplia cuenca vertiente (1200 km<sup>2</sup>) donde, además, se alcanzan cotas muy elevadas (hasta 3482 m.s.n.m.). En su borde sur se encuentra el Mar Mediterráneo, por lo que el riesgo de intrusión marina podría hacerse efectivo si se produjera un desequilibrio entre salidas y entradas en el sistema. En el extremo norte se pone en contacto con el acuífero carbonatado de Escalate. También en esta zona está la conexión hídrica con el acuífero aluvial del río Guadalfeo. De hecho, se puede considerar que el

acuífero Motril-Salobreña es la prolongación del aluvial del río. El resto de límites del acuífero está constituido por esquistos con permeabilidades muy bajas, por lo que se pueden considerar como contornos impermeables en general. Las principales fuentes de recarga del sistema están representadas en la figura 1:

E1: Entrada subterránea a partir del acuífero aluvial del río Guadalfeo.

E2: Entrada subterránea por el contacto en el borde norte con el acuífero carbonatado de Escalate.

E3: Infiltración directa en el cauce del río Guadalfeo.

E4: Recarga producida por excedentes de riego en el acuífero. El riego por inundación es el sistema tradicional debido a la agricultura de plantas con necesidades hídricas muy elevadas como es el caso de la caña de azúcar.

E5: Infiltración a partir del agua de precipitación.

S1: Extracciones por bombeo.

S2: Descarga del acuífero al río.

S3: Descarga subterránea por el borde sur hacia el mar Mediterráneo.

## Balances previos

En los estudios realizados en el acuífero Motril-Salobreña se han propuesto balances hídricos con resultados muy heterogéneos (Tabla I). Los métodos de estudio han sido muy variados, se han

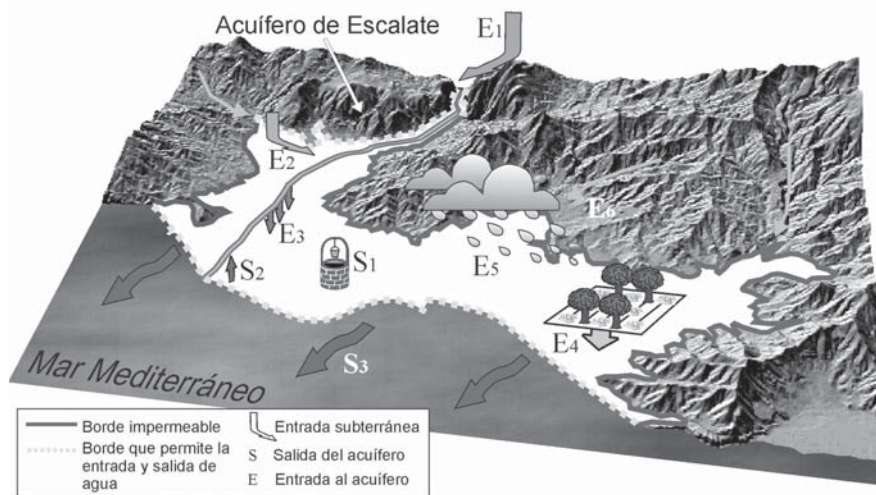


Fig. 1.- Esquema con las entradas y salidas del acuífero Motril-Salobreña.

Fig. 1.- Scheme of water inflows and outflows in Motril-Salobreña aquifer.

basado en observaciones puntuales, cálculos simples como aplicación directa de la ley de Darcy, cierre de los balances o modelos numéricos. Sin embargo, se puede observar una dispersión muy amplia de los resultados propuestos e incertidumbres que muchas veces están motivadas por los datos utilizados para el estudio.

Los balances más recientes apuntan a un dominio de las entradas por el excedente de riego e infiltración del río Guadalfeo, claramente dominantes sobre las entradas a partir de los acuíferos del borde norte. En general, el volumen de recursos anuales calculado ha tendido hacia una disminución desde los 60-70 hm<sup>3</sup> (Castillo, 1975; Castillo y Fernández-Rubio, 1978), hasta alrededor de los 35 hm<sup>3</sup> de Heredia (2003), Ibáñez (2005) (Tabla I) y Calvache *et al.* (2009). Las entradas con mayor discrepancia entre los distintos trabajos son las producidas a través del acuífero aluvial del río Guadalfeo (desde 25 hm<sup>3</sup> de la CHSE hasta 3,5 hm<sup>3</sup> de Heredia), la infiltración del río Guadalfeo (desde 25 hm<sup>3</sup> de Castillo hasta 11,5 hm<sup>3</sup> del ITGE) y la recarga por lluvia (desde los que la consideran como una entrada con entidad propia como Castillo y CHSE hasta el resto de investigadores que la consideran prácticamente nula o la calculan de manera conjunta con la infiltración de los regadíos). En cuanto a las salidas, las variaciones en la descarga al mar están directamente relacionadas con el volumen de entradas que tiene el sistema. Para el caso de los bombeos se observa una tendencia a la disminución desde los años 70 hasta la actualidad.

En los estudios de Heredia (2003) e Ibáñez (2005) se han utilizado modelos numéricos de flujo que permiten un ma-

yor grado de detalle. Sin embargo, presentan problemas ya que en el primer caso se han utilizado las medias anuales para un periodo de 16 años por lo que se enmascaran las diferencias entre años secos y húmedos. En el segundo caso, se considera el balance hidrológico 2001-2002, por lo que los resultados están condicionados por las características climáticas de ese periodo.

**Resultados**

El balance hídrico que se presenta en este trabajo se ha realizado a partir de un modelo de flujo en régimen transitorio mediante el programa MODFLOW (MacDonald y Harbaugh, 1988), con una discretización espacial de 50 x 50 m y temporal de 1 mes. Se calibraron automáticamente mediante método inverso las propiedades hidráulicas del acuífero y se obtuvo un error medio entre

niveles piezométricos simulados y los medidos de 0,13 m. Las entradas se calcularon o a partir de observaciones y mediciones de campo o a partir de informes previos y están detalladas en Duque (2009).

Los resultados obtenidos tras el proceso de calibración muestran el balance hídrico para cada año durante un periodo de 6 años consecutivos. Es la primera vez que se presenta un balance de estas características en el acuífero Motril-Salobreña. El total de entradas y salidas para cada año está directamente relacionado con el grado de humedad de ese periodo. Así, los años 2 y 3 (2002-2003 y 2003-2004) son los más húmedos. Los años 5 y 6 son los más secos junto con el 4. En este último caso, a pesar de tratarse de un año seco, sus entradas totales aparecen con valores medios debido a que la entrada relacionada con el agua almacenada (almacenamiento en Tabla II) durante los años previos compensa el déficit hídrico. Los años con más lluvia no afectan únicamente a la entrada por precipitación, también otras entradas se verán incrementadas como la procedente del acuífero carbonatado o la del río Guadalfeo. La recarga por exceso de riego permanece invariable para cada año debido a que se ha considerado constante la distribución de cultivos para el mencionado periodo.

La principal salida del sistema es la descarga subterránea al mar, seguida por los bombeos (Tabla II). El almacenamiento, en este caso, se asocia al agua que se acumula en el acuífero debido al incremento de los niveles piezométricos durante los periodos húmedos, que es la razón por la que es tan elevado durante los años 2 y 3.

La influencia relativa anual (%) de cada entrada se ha representado en la fi-

Entradas y Salidas (hm <sup>3</sup> /año)	Castillo (1975)	CHSE (1984)	ITGE (1988)	Heredia (2003)	Ibáñez (2005)
Acuífero aluvial del río	-	25	15.5	3.5	4.7
Acuífero carbonatado	6	3	2	4.0	4.2
Infiltración del río Guadalfeo	25	13	11.5	11.6*	11.5
Exceso de riego	8-13	6	16.9	16.8**	13.6*
Recarga por lluvia	6	3	-	-	-
Intrusión marina	-	-	-	-	-
Otros	15-20	3	1.4	-	-
<b>TOTAL ENTRADAS</b>	<b>60-70</b>	<b>53</b>	<b>47.3</b>	<b>35.9</b>	<b>34.0</b>
Bombeos	16	25	17.1	15.4	7.5
Recarga del acuífero al río	-	-	-	0.4	0.3
Descarga al mar	40-45	22	30.2	16.8	26.2
Otros	6-10	6	-	1.8	-
<b>TOTAL SALIDAS</b>	<b>62-71</b>	<b>53</b>	<b>47.3</b>	<b>34.4</b>	<b>34.0</b>

Tabla I.- Balances hídricos previos del acuífero Motril-Salobreña.

Table I.- Previous Motril-Salobreña aquifer water balance.

ENTRADAS (hm <sup>3</sup> )	Año 1 (01-02)	Año 2 (02-03)	Año 3 (03-04)	Año 4 (04-05)	Año 5 (05-06)	Año 6 (06-07)
Almacenamiento	6.69	5.50	5.68	8.78	5.42	3.27
Acuífero aluvial del río	0.36	0.48	1.12	0.30	0.48	0.43
Acuífero carbonatado	5.60	5.81	6.78	4.82	4.73	4.80
Exceso de riego	9.16	9.00	9.29	9.04	9.13	9.14
Río Guadalfeo	5.22	10.14	10.36	1.21	0.92	1.05
Lluvia	1.22	8.60	5.99	4.39	0.70	0.05
<b>Total</b>	<b>28.25</b>	<b>39.53</b>	<b>39.22</b>	<b>28.54</b>	<b>21.38</b>	<b>18.74</b>

SALIDAS (hm <sup>3</sup> )	Año 1 (01-02)	Año 2 (02-03)	Año 3 (03-04)	Año 4 (04-05)	Año 5 (05-06)	Año 6 (06-07)
Almacenamiento	1.82	8.96	7.04	2.34	1.41	1.67
Salida al mar	19.19	23.51	24.46	20.34	14.40	11.30
Bombeos	7.25	6.97	6.66	6.41	6.36	6.15
Acuífero carbonatado	0.00	0.02	0.61	0.06	0.09	0.06
Ganancia del río	0.00	0.06	0.45	0.00	0.00	0.00
<b>Total</b>	<b>28.25</b>	<b>39.53</b>	<b>39.22</b>	<b>28.54</b>	<b>21.38</b>	<b>18.74</b>

Tabla II.- Balance hídrico obtenido para el periodo de 6 años calculado mediante el modelo numérico.

Table II.- Water balance obtained for the 6 years period calculated with the numerical model.

gura 2. Queda patente el descenso de recarga del río desde el año 2005, momento de la entrada en funcionamiento de la presa de Rules. Se observa que el año 2004-2005 fue un periodo suficientemente húmedo como para considerar la lluvia una recarga importante al acuífero, sin embargo, las entradas por infiltración del agua del río Guadalfeo no fueron así. La causa directa con la que se relaciona esta situación es la puesta en marcha (inicio del almacenamiento) durante el año 2005 de la presa de Rules. En este sentido, el caudal del río Guadalfeo que llegaba hasta el acuífero Motril-Salobreña fue muy limitado, reduciendo la infiltración con respecto a años anteriores por la presa. Los porcentajes obtenidos para el exceso de riego y el borde norte (aluvial del Guadalfeo y acuífero carbonatado) sufren variaciones relacionadas con la importancia relativa respecto al resto de factores de recarga, sin embargo, los cambios volumétricos absolutos son reducidos.

La comparación con los balances obtenido por otros autores permite precisar algunos aspectos relevantes relativos al cálculo del balance hídrico en este acuífero. En el caso de la entrada por el aluvial del río Guadalfeo, las diferencias están motivadas, a pesar de que se lleva estudiando la zona más de 30 años, por las fuentes de recarga subterráneas y la dificultad para estimarlas con precisión. Las diferencias entre las cantidades de agua extraídas del acuífero por bombeo, en las que se observa una tendencia a la disminución en las estimaciones realizadas puede vincularse a los cambios en usos del suelo. En las últimas décadas se ha producido un aumento de la superficie urbana en detrimento de los campos

de cultivo y se ha extendido el uso de sistemas de riego con menor consumo (como el riego por goteo en invernaderos) frente a los riegos por inundación de la caña de azúcar. Otra observación de gran importancia se relaciona con las diferencias en los totales de entradas y salidas del acuífero estimados. Si se com-

para los balances obtenidos durante el periodo 2001-2007, se constata el hecho de que aún utilizando la misma metodología de estudio, las diferencias entre años pueden llegar a representar un 100 %. Estas diferencias se relacionan con la humedad del año hidrológico de estudio. Por este motivo los balances realizados únicamente para un año deberían acompañarse de un estudio de la pluviometría anual permitiendo esto encuadrar el balance dentro de un contexto climático adecuado.

**Conclusiones**

El impacto que produce la presa sobre la recarga del sistema queda claramente reflejado en el cambio de las entradas por infiltración del agua del río Guadalfeo que se observa desde el año 2005.

La recarga por precipitación, que en algunos de los balances ha sido despreciada, puede representar un aporte importante durante años húmedos.

Los cambios en las extracciones por bombeo calculados por diferentes investigadores muestran una tendencia a la disminución. Las causas podrían asociarse a

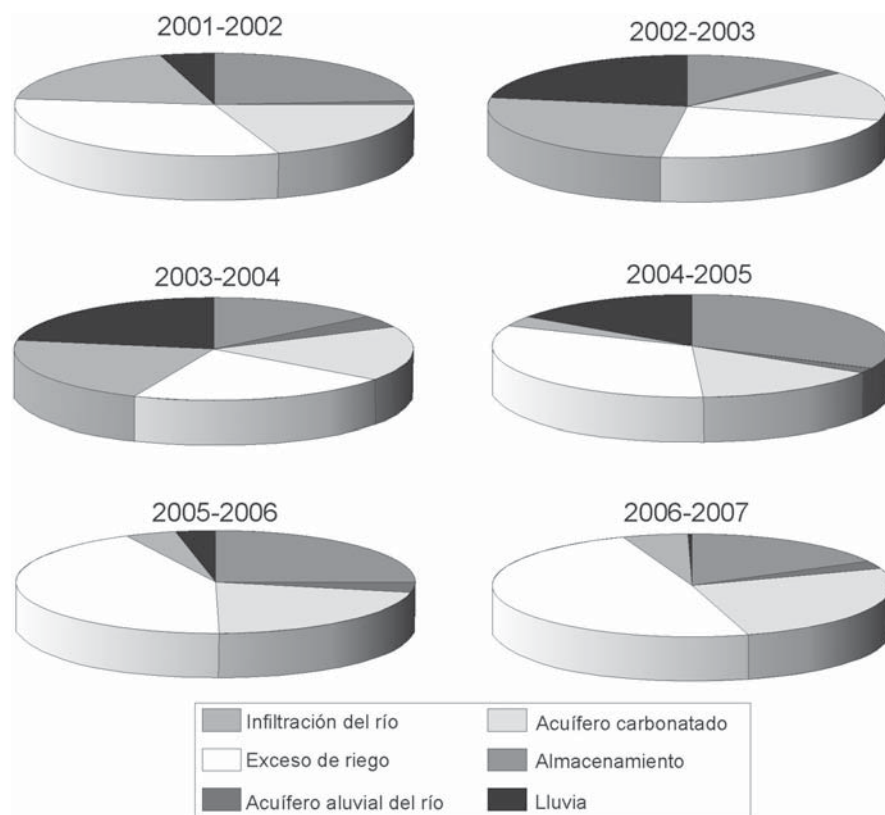


Fig. 2.- Representación gráfica de los balances hídricos obtenidos mediante el modelo numérico.

Fig. 2.- Graphical representation of the water balance obtained with the numerical model.



los cambios en los usos del suelo experimentados en el acuífero Motril-Salobreña y las variaciones en las técnicas de riego aplicadas en los cultivos. En un futuro próximo, es posible que la facilidad para regular el río Guadalfeo mediante la presa de Rules también contribuya a un menor uso de las aguas subterráneas.

Los resultados obtenidos mediante el modelo numérico para varios años consecutivos muestran cómo los trabajos previos pueden ser muy dependientes del tipo de año hidrológico. Se observa cómo en el periodo 2001-2007 hay cambios anuales que pueden suponer el doble de entradas y salidas del sistema hidrogeológico. Las diferencias tan acusadas entre los balances calculados por diferentes investigadores en el acuífero Motril-Salobreña están relacionadas con este motivo.

Con los resultados del balance para varios años consecutivos se pueden establecer como años medios de este periodo los correspondientes a 2001-02 y 2004-05 en los que las entradas anuales fueron 28 hm<sup>3</sup>. Para estos casos las entradas subterráneas por exceso de riego representaron un tercio de total, las entradas por los acuíferos del borde norte alrededor del 20 % y los aportes del río al acuífero variaron desde un 18 % del total antes de la construcción de la presa a menos del 5 % tras la interrupción del

flujo en el río Guadalfeo como consecuencia de la puesta en funcionamiento de la mencionada obra.

#### Agradecimientos

La financiación de esta investigación se hizo mediante el proyecto CGL2008-05016 financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación y el grupo RNM-369 de la Junta de Andalucía. Los autores agradecen Juan Carlos Rubio, Antonio González y José Antonio Navarro (IGME) su colaboración en la obtención de muchos de los datos utilizados en el modelo. Agradecemos los comentarios de Antonio Pulido-Bosch y de un revisor anónimo para mejorar la calidad final del trabajo.

#### Referencias

- Calvache, M.L., Ibáñez, P., Duque, C., López-Chicano, M., Martín-Rosales, W., González-Ramón, A. y Rubio, J.C. (2009). *Hydrol. Process.* 23, 1268-1281.
- Calvache M.L., Rubio J.C., López-Chicano M., González-Ramón A., Ibáñez S., Martín-Rosales W., Soler R., Díaz-Losada E. y Peinado-Parra T. (2003). En: *Simposio Internacional sobre Tecnología de la Intrusión de agua de mar en acuíferos costeros*. IGME, Madrid, 77-85.
- Castillo E. (1975). *Hidrogeología de la Vega de Motril-Salobreña y sus bordes*. Tesis de licenciatura. Univ. de Granada, 184 p.
- Castillo E. y Fernández Rubio R. (1978). *Boletín I.G.M.E.*, LXXXIX, Madrid, 39-48
- Confederación Hidrográfica del Sur-Instituto de Reforma y Desarrollo Agrario (CHSE). (1984). *Estudio de viabilidad de la ampliación de la zona regable de Motril-Salobreña hasta la cota 300*.
- Duque C. (2009). *Influencia antrópica sobre la hidrogeología del acuífero Motril-Salobreña*. Tesis doctoral. Univ. de Granada, 194 p.
- Heredia J., Murillo J.M., García-Aróstegui J.L., Rubio J.C. y López-Geta J.A. (2003). *Revista Latino-Americana de Hidrogeología* 3, 73-83.
- Ibáñez, S. (2005). *Comparación de la aplicación de distintos modelos matemáticos sobre los acuíferos costeros detríticos*. Tesis Doctoral. Univ. de Granada, 304 p.
- ITGE (1988). *Investigación hidrogeológica para apoyo a la gestión hidrológica en la cuenca del río Guadalfeo*. Cuenca del Sur de España, 144 p.
- MacDonald M.G. y Harbaugh A.W., (1988). *U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, book 6, chap. A1*, 586 p.