

EVALUACIÓN DE RECURSOS HÍDRICOS Y BALANCE HIDROGEOLÓGICO EN ACUÍFEROS KARSTICOS DE MONTAÑA. CASO DE LA SIERRA DE GRAZALEMA (CÁDIZ, ESPAÑA)

José Francisco MARTÍN RODRÍGUEZ*, Damián SÁNCHEZ GARCÍA*, Matías MUDARRA MARTÍNEZ*, Bartolomé ANDREO NAVARRO*, Manuel LÓPEZ RODRÍGUEZ y María Rocío NAVAS GUTIÉRREZ****

(*) Centro de Hidrogeología de la Universidad de Málaga (CEHIUMA), 29071, Málaga (España) josefranciscomr@uma.es, dsanchez@uma.es, mmudarra@uma.es, andreo@uma.es

(**) Oficina de Planificación Hidrológica. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía, manuel.lopez.rodriguez@juntadeandalucia.es, mrocionavas@juntadeandalucia.es

RESUMEN

En este trabajo se presenta el procedimiento para evaluar los recursos hídricos y realizar el balance hidrogeológico de los acuíferos kársticos de la Sierra de Grazalema (provincia de Cádiz, España), durante el periodo 2012/13-2014/15. Por una parte se han cuantificado las salidas de los acuíferos a partir de la integración del hidrograma de los manantiales y por otra se han estimado las entradas, mediante diversas ecuaciones de balance hídrico del suelo: Thornthwaite, Blaney-Criddle y Hargreaves. Los valores medios anuales de recursos determinados con la ecuación de Hargreaves son los que más se asemejan a las salidas medidas en la mayoría de los acuíferos. Sin embargo, en uno de ellos se ha detectado un exceso medio anual de 31 hm³/año de las entradas con respecto a las salidas, que podría estar ligado a transferencias subterráneas a otros sistemas kársticos circundantes.

Palabras clave: *Acuífero kárstico, balance hidrogeológico, evaluación de recursos hídricos, Sur de España*

INTRODUCCIÓN

Un cuarto de la población mundial se abastece del agua almacenada en acuíferos carbonáticos (FORD Y WILLIAMS, 2007), aunque no siempre se dispone de una evaluación de sus recursos hídricos. Esta circunstancia parte del limitado conocimiento hidrogeológico que se tiene de muchos acuíferos, el cual está relacionado, a su vez, con la dificultad para obtener datos precisos y continuos de los puntos de descarga. Ello es más común, si cabe, en sistemas kársticos situados en áreas montañosas, donde la estructura geológica, los procesos de recarga (difusa y concentrada) y la variabilidad pluviométrica ligada a la orografía añaden complejidad a la adquisición de datos y, por ende, a la evaluación de los recursos hídricos. En la presente

comunicación se expone, a modo de ejemplo, el procedimiento seguido y los resultados alcanzados durante la evaluación de los recursos hídricos y el posterior balance hidrogeológico efectuado en los acuíferos carbonáticos existentes en el Parque Natural de la Sierra de Grazalema (provincia de Cádiz, sur de España). Para ello se han medido, por una parte, las salidas o descarga de los acuíferos y, por otra, se han estimado las entradas calculadas mediante diversas ecuaciones del balance hídrico del suelo. Todo ello permite contrastar los métodos aplicados y los resultados obtenidos.

En la Sierra de Grazalema se han diferenciado tradicionalmente 7 acuíferos carbonáticos (IGME, 1984), cuyos límites se han establecido atendiendo a criterios geológicos (límites de afloramientos de materiales de alta y baja permeabilidad, fallas, pliegues, etc.). La extensa superficie de afloramientos carbonáticos, la elevada permeabilidad de la mayoría de ellos y la existencia de un régimen pluviométrico con abundantes precipitaciones, provocan que los recursos hídricos sean elevados en los acuíferos de la Sierra de Grazalema. Sin embargo, la información disponible respecto al funcionamiento de estos acuíferos, y en concreto la relación hidrogeológica entre ellos, es bastante limitada, lo que dificulta una gestión eficaz de sus recursos, particularmente en un contexto de cambio climático. Por ello, desde 2012 se está realizando un estudio exhaustivo de los distintos parámetros que condicionan el balance hidrogeológico de los acuíferos de la Sierra de Grazalema. La cuantificación de las componentes de dicho balance ayudará a identificar las posibles transferencias subterráneas entre los distintos acuíferos, así como con sistemas limítrofes.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El Parque Natural de la Sierra de Grazalema está situado en el sur de España (Fig. 1), donde ocupa una superficie de 260 km² (120 km² de afloramientos carbonáticos permeables). El clima predominante es semi-continental mediterráneo. La lluvia se registra principalmente en otoño e invierno y en menor medida en primavera, asociada a los vientos húmedos procedentes del Océano Atlántico. La precipitación media anual es del orden de 1350 mm (SÁNCHEZ et al., en prensa), aunque puede variar de manera significativa dependiendo de la altitud y del sector considerado: desde 900 mm en el extremo N-NO hasta 1800 mm en la parte alta del macizo. El periodo de estudio considerado en este trabajo comprende los años hidrológicos 2012/13 (1997 mm de lluvia anual), 2013/14 (1424 mm) y 2014/15 (1020 mm). La temperatura media del aire, calculada a partir de series históricas (1984/85 – 2014/15) es 15,7 °C.

Los acuíferos existentes en la Sierra de Grazalema están formados por dolomías y calizas jurásicas, con aproximadamente 500 m de espesor, fracturadas y karstificadas. En la base de estos materiales hay arcillas y evaporitas de edad Triásico superior, mientras que a techo aparecen margas y margocalizas de edad Cretácico-Oligoceno (MARTÍN-ALGARRA, 1987). La estructura geológica está definida por pliegues de dirección NE-SO, en cuyos núcleos anticlinales se pueden reconocer dolomías y calizas, mientras que en los sinclinales afloran margas cretácicas. Además, arcillas y areniscas de tipo Flysch cabalgan sobre las rocas anteriores, excepto en algunas zonas, como en el Corredor del Boyar (Fig. 1), donde los materiales del Flysch quedan imbricados estructuralmente entre las rocas mesozoicas, en el denominado “Corredor del Boyar” (MARTÍN-ALGARRA, 1987). Este corredor provoca la compartimentación hidrogeológica del área de estudio en dos sectores principales: uno al sur (sector penibético) y otro al norte (sector subbético). El primer sector está constituido por las sierras de Endrinal, Cañillo y Ubrique y las escamas del Boyar. El segundo lo conforman las

sierras de Zafalgar, Pinar y Albarracín. Existe un tercer sector, constituido por la Sierra de la Silla, de menores dimensiones y separado de los anteriores por otros accidentes tectónicos.

La recarga de los acuíferos tiene lugar principalmente por infiltración directa del agua de lluvia y, en mucha menor medida, por la infiltración concentrada de agua superficial en sumideros kársticos. Por su parte, la descarga se realiza en régimen natural a través de manantiales localizados en los bordes de los afloramientos carbonáticos (Fig. 1). Los bombeos representan una ínfima fracción de las salidas existentes (SÁNCHEZ et al., en prensa).

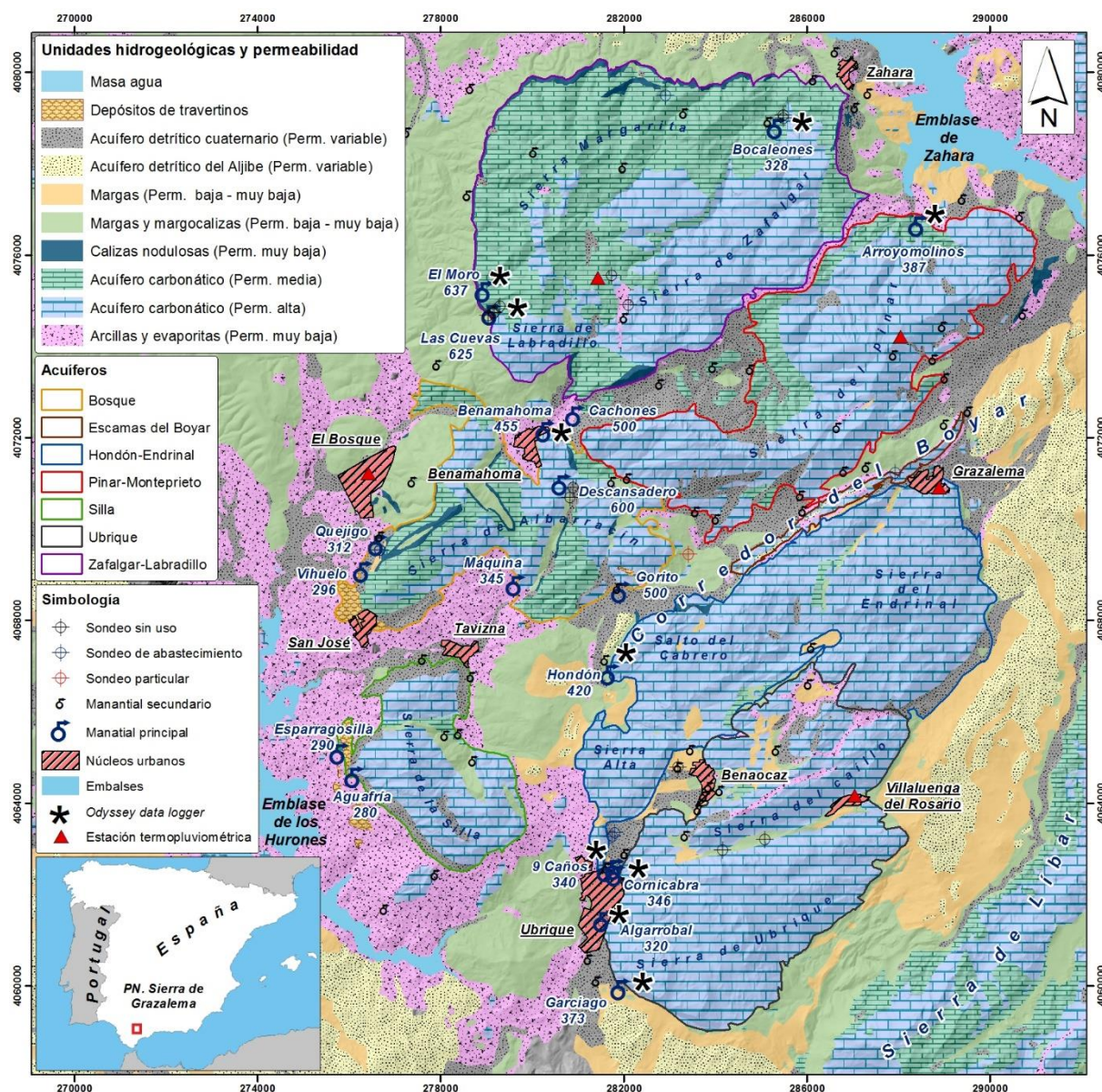


Figura 1. Mapa hidrogeológico de la Sierra de Grazalema.

METODOLOGÍA

Para la evaluación de los recursos hídricos y la posterior realización del balance hidrogeológico en la Sierra de Grazalema se han medido, por una parte, las salidas o descargas que corresponden a los caudales drenados por los principales manantiales y, por otra parte, se

han estimado las entradas (lluvia útil o infiltración eficaz). La recarga alóctona, procedente de la precipitación caída sobre afloramientos poco permeables, representa una fracción mínima respecto al valor total y no se ha considerado en este trabajo.

La evaluación de las **salidas** correspondientes a los diferentes acuíferos se ha efectuado siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

- Desde septiembre de 2012 se han realizado medidas de caudal en los 18 manantiales más significativos del área de estudio (aquellos cuyos caudales medios superan 25 l/s, Fig. 1), mediante micromolinete (OTT® C2) y/o aforador químico (Madd® Technologies, Salinomadd).

- Instalación de dispositivos de registro continuo (Odyssey® *capacitance water level dataloggers*) de altura de lámina de agua, en 11 de los 18 manantiales considerados.

- Aplicación de ecuaciones que relacionan las variaciones de altura de lámina de agua en cada manantial con sus respectivas medidas de caudal (curvas de gasto). Con ello se obtiene el hidrograma de cada surgencia, con paso de tiempo horario.

- Integración del hidrograma para cuantificar el volumen total de descarga anual de los acuíferos a través de los manantiales.

La evaluación del volumen de **entrada o recarga** de los acuíferos de la Sierra de Grazalema, durante cada uno de los tres años hidrológicos considerados, se ha llevado a cabo mediante diversas ecuaciones que permiten estimar el balance hídrico diario de agua en el suelo: THORNTHWAITE (1948), BLANEY-CRIDDLE (1962) y Hargreaves (HARGREAVES y SAMANI, 1985). A continuación se detallan los pasos seguidos:

- Corrección y completado, mediante correlación lineal, de las series de datos diarios de precipitación (P) y temperatura del aire registradas en las 11 estaciones existentes en el área de estudio y su entorno (Fig. 1).

- Obtención de los valores de evapotranspiración real (ETR) y lluvia útil (PU) mediante la aplicación de los diversos métodos de balance de agua en el suelo. Los cálculos se han efectuado con el código *TRASERO 2.1* (PADILLA & DELGADO, 2013). En todos los casos se ha obtenido la lluvia útil (expresada en mm) de cada acuífero, para capacidades de campo (CC) de 25 y de 50 mm y para los distintos años hidrológicos del periodo considerado. La PU es prácticamente equivalente a la recarga sobre los materiales carbonáticos permeables, considerando la escorrentía superficial despreciable a efectos del balance hídrico, debido a la gran permeabilidad de los afloramientos.

- Elaboración de mapas de isovalores de cada una de las variables anteriores (P, PU y ETR) mediante *krigeaje* con corrección manual y sistemas de información geográfica (SIG).

- Planimetría de las áreas definidas por cada dos isolíneas consecutivas sobre las superficies permeables de los acuíferos mediante la utilización de SIG (Fig. 2).

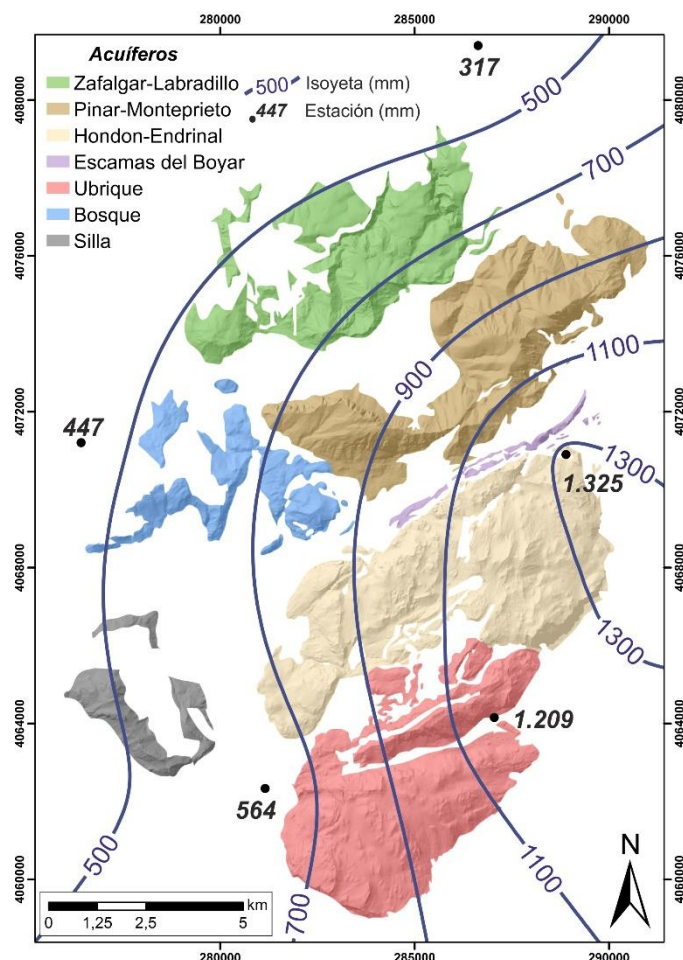


Figura 2. Distribución espacial de la lluvia útil (PU, en mm), sobre los afloramientos permeables, para el año medio en el área de estudio

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la excepción del acuífero de Hondón-Endrinal, los valores de recarga obtenidos mediante el método de Hargreaves y $CC = 50$ mm son los que más se asemejan a las salidas medidas en los diferentes acuíferos (Tabla 1). Por tanto, se ha elegido este método como el más adecuado para la evaluación de los recursos hídricos. La precipitación media registrada sobre el área de estudio durante los tres años hidrológicos considerados fue de $183,6 \text{ hm}^3/\text{año}$, de los cuales $124,1 \text{ hm}^3/\text{año}$ produjeron recarga y el resto ($59,5 \text{ hm}^3/\text{año}$) evapotranspiración. Concretamente, la cantidad de agua de lluvia caída sobre el sector subbético (sector septentrional) fue de $77,1 \text{ hm}^3/\text{año}$ (Tabla 1), una parte de la cual generó evapotranspiración ($29,5 \text{ hm}^3/\text{año}$) y el resto ($47,6 \text{ hm}^3/\text{año}$) es la cifra de recarga media anual durante el periodo de investigación.

Acuífero	Superficie permeable (Km ²)	Precipitación total (PP), lluvia útil (PU) y evapotranspiración real (ETR). (hm ³)									Salidas (hm ³)			Media anual	Diferencia			
		2012/13			2013/14			2014/15			Año hidrológico							
		P	PU	ETR	P	PU	ETR	P	PU	ETR	2012/13	2013/14	2014/15					
Ubrique	25,9	56,3	45,1	11,2	39,1	29,2	9,9	29,1	19,8	9,3	41,5	31,4	10,1	52,6	36,4	16,2	35,1	-3,7
Hondón - Endrinal	30,5	80,6	60,7	19,90	57	39,5	17,6	41,3	23,9	17,4	59,6	41,4	18,2	11,2	4,7	3,3	6,4	+35
Sec. Penibético	56,4	136,9	105,8	31,1	96,1	68,7	27,4	70,4	43,7	26,6	101,1	72,7	28,4	63,8	41,1	19,5	41,5	+31,2
Pinar - Monteprieto	29,3	60,4	38,4	22,0	32,9	24,6	8,3	25,1	12,9	12,2	39,5	25,3	14,2	38,7	23,0	14,6	25,4	-0,1
Zafalgar - Labradillo	18,4	35,5	20,6	14,9	15,4	13,4	2,0	14,0	6,8	7,2	21,6	13,6	8,0	31,4	18,4	10,4	20,1	-6,5
Escamas	1,1	3,3	2,6	0,7	2,26	1,7	0,6	1,5	0,9	0,6	2,4	1,7	0,7	1,3	1,2	0,7	1,1	+0,6
El Bosque	8,6	18,3	9,5	8,8	13,6	7,2	6,4	9,1	4,2	4,9	13,7	6,9	6,8	3,6	1,9	1,4	2,3	+4,6
Sec. Subbético	57,4	117,5	71,1	46,4	64,2	46,8	17,4	49,7	24,8	24,9	77,1	47,6	29,5	75,0	44,5	27,1	48,9	-1,3
Silla	4,9	7,4	5,1	2,3	5,3	3,9	1,4	3,4	2,5	0,9	5,4	3,8	1,6	4,2	2,2	1,2	2,6	+1,2
Total	118,6	261,8	182,0	79,8	165,6	119,4	46,2	123,5	71,0	52,5	183,6	124,1	59,5	143,1	87,8	47,9	92,9	+31,2

Tabla 1. Recarga media de los acuíferos del área de estudio, calculados mediante el balance del agua en el suelo (ecuación de Hargreaves) con capacidad de campo de 50 mm, para el periodo 2012/13-2014/15.

Las salidas medidas controladas ascienden a 48,9 hm³/año. La pequeña diferencia existente entre entradas y salidas, equivalente a un 2% de los recursos evaluados, queda dentro del margen de error asociado a las técnicas utilizadas, asumiendo que no ha habido cambios en el almacenamiento. La precipitación media registrada en el acuífero de la sierra de la Silla durante el periodo 2012/13-2014/15 ha sido de 5,4 hm³/año (Tab. 1): 1,6 hm³/año se han evapotranspirado y los 3,8 hm³/año restantes han producido recarga. Las salidas controladas ascienden a 2,6 hm³/año. Esta diferencia entre entrada y salida podría deberse a un excesivo dimensionamiento de la componente de recarga o a la existencia de puntos de descarga del acuífero no controlados.

Sobre los afloramientos carbonáticos del sector penibético, la precipitación media fue de 101,1 hm³/año. De ellos, 28,4 hm³/año fueron devueltos a la atmósfera mediante evapotranspiración y 72,7 hm³/año contribuyeron a la recarga directa de los acuíferos. Las salidas medias ascienden a 41,5 hm³/año, con un máximo de 63,8 hm³/año (2012/13) y un mínimo de 19,5 hm³/año (2014/15). Según estos datos, las entradas medias superarían en 31,2 hm³/año a las salidas. Esta diferencia corresponde principalmente al acuífero de Hondón-Endrinal, donde las entradas calculadas fueron 35 hm³/año superiores a las salidas medias. Una posible explicación es que parte de los excedentes alimenten el acuífero de la sierra de Ubrique, cuyas salidas superan a las entradas en 3,7 hm³/año. Aun considerando esta transferencia, restarían 31,2 hm³ de volumen medio anual de recursos hídricos que no fueron drenados por los manantiales ubicados en los bordes de los acuíferos del sector penibético (Fig. 1). Por tanto, debe existir transferencia subterránea hacia otros sistemas acuíferos drenados por manantiales situados fuera del ámbito de la Sierra de Grazalema.

Es posible que parte de estos recursos sean transferidos hacia el acuífero de la Sierra de Líbar, localizado al SE de la zona de estudio (Fig. 1, Fig 4). La estructura geológica es coherente con esta hipótesis, pues la continuidad en profundidad de las formaciones jurásicas permeables posibilitaría la transferencia subterránea de recursos hídricos hacia dicho acuífero, cuya cota de drenaje (230 m s.n.m.) es más baja que la existente en el borde de los afloramientos penibéticos de la Sierra de Grazalema (320-420 m s.n.m.).

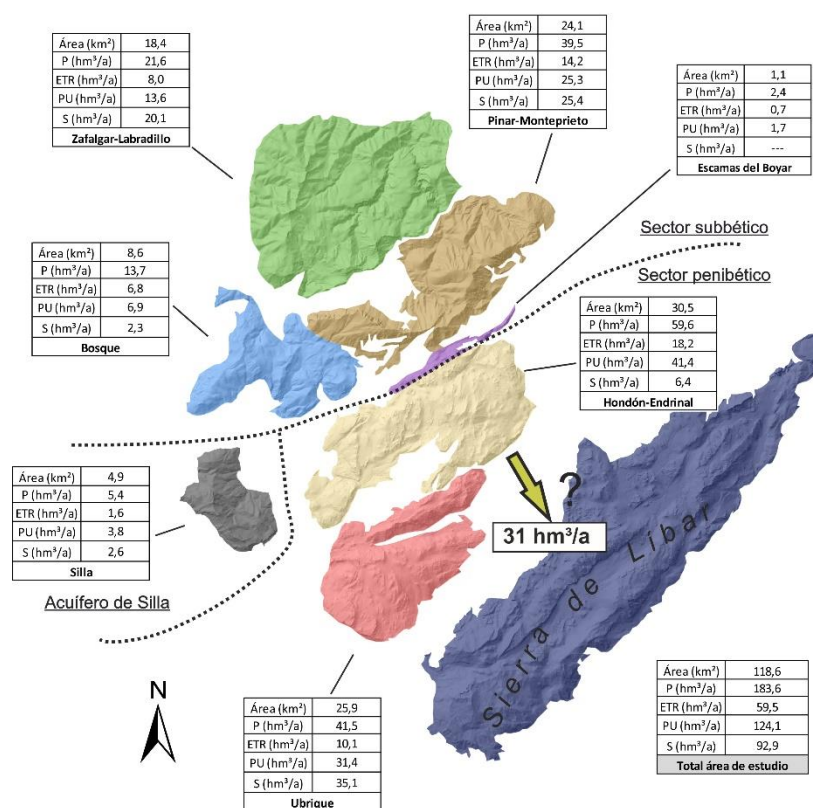


Figura 4. Representación del balance hidrogeológico en los acuíferos de la Sierra de Grazalema y de las posibles transferencias de recursos. Todas las cifras están expresadas en hm³/año.

CONCLUSIONES

La evaluación de recursos y el posterior establecimiento del balance hidrogeológico constituyen una buena aproximación metodológica para la detección y cuantificación de las transferencias que parecen producirse hacia acuíferos colindantes. En el caso de la Sierra de Grazalema, el conjunto de acuíferos que engloba el sector subbético constituye un subsistema independiente en el que las entradas estimadas no difieren significativamente de las salidas medidas. Sin embargo, en el sector penibético se ha identificado un importante déficit (>30 hm³/año) en las salidas, lo que indica una potencial transferencia de recursos, probablemente hacia el acuífero de la Sierra de Líbar (Fig. 4). Esta posible transferencia de recursos debe ser confirmada mediante la realización de ensayos de trazadores, inyectando en la zona de recarga del acuífero de la sierra del Endrinal y muestreando en los principales manantiales de las sierras de Grazalema y Líbar. La detección del trazador en los trazadores en esta última, confirmaría la existencia de esta transferencia de recursos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BLANEY, H.F. & CRIDDLE, W.D. (1962). *Determining consumptive use and irrigation water requirements*. USDA Technical Bulletin 1275, US Department of Agriculture, Beltsville.
- FORD, D.C. & WILLIAMS, P.W. (2007). *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Wiley, Chichester. 562 p.
- HARGREAVES, G. & SAMANI, Z. (1985). *Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature*. Am. Soc. Agric. Eng. 1(2): 96-99.

- IGME (1984). *Estudios de investigación hidrogeológica para la regulación de los recursos hídricos subterráneos de la divisoria Guadalete-Guadiaro*. Informe técnico. Instituto Geológico y Minero de España 216 p.
- MARTÍN-ALGARRA, A. (1987). *Evolución geológica alpina del contacto entre las Zonas Internas y las Zonas Externas de la Cordillera Bética*. Tesis Doctoral, Univ. Granada, 1171 p.
- PADILLA, A. y DELGADO, J. (2013). *Tratamiento y gestión de series temporales hidrológicas. Programa TRASERO 2.0*. Departamento de ciclo hídrico, Diputación Provincial de Alicante, 87 p.
- SÁNCHEZ, D., MARTÍN-RODRÍGUEZ, J.F., MUDARRA, M., ANDREO, B., LÓPEZ, M. & NAVAS, M.R. (2016) *Time-lag analysis of natural responses during unitary recharge events to assess the functioning of carbonate aquifers in Sierra de Grazalema Natural Park (Southern Spain)*. Eurokarst 2016, Neuchâtel, pp 157-167, ISBN:978-3-319-45465-8.
- THORNTHWAITE, C.W. (1948). *An approach toward rational classification of climate*. Geograph. review 38(1): 55-94.