

MODELOS HIDROLÓGICOS Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA LA ESTIMACIÓN DE LOS RECURSOS HÍDRICOS: APLICACIÓN DE GIS-BALAN A VARIAS CUENCAS ESPAÑOLAS

J. Samper¹, M.A. García Vera², B. Pisani¹, D. Alvares¹, A. Varela¹ y J. A. Losada²

¹ Escuela de Caminos, Universidade da Coruña, Campus Elviña, 15192 Coruña, España; *jsamper@udc.es*

² Confederación Hidrográfica del Ebro, Ministerio de Medio Ambiente, España; *mgarciave@chebro.es*

RESUMEN. Se presenta un modelo hidrológico distribuido para la estimación de los recursos hídricos obtenido a partir de VISUAL BALAN v2.0, desarrollado por el Grupo de Hidrología de la Universidad de A Coruña, que se ha acoplado a una plataforma SIG. GIS-BALAN resuelve las ecuaciones del balance hidrológico en el suelo edáfico, en la zona no saturada y en el acuífero, evaluando las componentes de manera secuencial. Requiere de pocos parámetros e incorpora un entorno amigable para la entrada de datos y la salida de resultados. Los niveles piezométricos y los caudales pueden ser comparados con los valores medidos permitiendo la calibración del modelo que puede ser realizada de forma automática minimizando una función objetivo de mínimos cuadrados. El código ha sido ampliamente utilizado como una herramienta para la evaluación de los recursos hídricos, la estimación de la recarga subterránea y en estudios de contaminación de acuíferos. Aquí se describen sus principales características ilustrando su aplicación en las cuencas del río Valiñas, cerca de A Coruña, y en la de la laguna de Gallocanta, en el suroeste de Aragón.

ABSTRACT. A distributed hydrologic code for water resources evaluation is presented: GIS-BALAN. It has been developed by enlarging the capabilities of a lumped hydrologic code (VISUAL BALAN v2.0) and coupling it to a GIS. GIS-BALAN evaluates hydrologic components in a sequential manner and performs a daily water balance in the upper soil, the unsaturated zone and the underlying aquifer. It requires only a few parameters and incorporates user-friendly interfaces for data input and post-processing of results. Computed groundwater levels and stream flows can be compared to measured data for the purpose of model testing and calibration which can be performed automatically by minimizing a least-squares criterion. The code has been widely used as a tool for water resources evaluation and groundwater recharge estimation. Here we illustrate its application to the Valiñas basin (A Coruña) and Gallocanta Lagoon in Southwest Aragón.

1. Introducción

La evaluación de los recursos hídricos requiere la realización de balances en las diferentes componentes del ciclo hidrológico. Para ello, las ecuaciones del balance deben normalmente resolverse utilizando programas de cálculo numérico. La estimación de la recarga de los acuíferos requiere utilizar métodos de balance (Custodio et al. 1997). Los resultados de los balances deben ser contrastados y calibrados con datos de oscilaciones piezométricas y de aforos en los puntos de salida de la cuenca. También es recomendable comprobar su coherencia con los resultados obtenidos con métodos hidroquímicos e isotópicos y con modelos numéricos de flujo en el acuífero. Los métodos de balance, sin embargo, tienen algunas limitaciones causadas fundamentalmente por las dificultades e incertidumbres existentes en la estimación de ciertos parámetros y componentes del balance, especialmente la reserva útil y la evapotranspiración real. En 1988 se comenzó a desarrollar el código BALAN (Samper y García Vera, 1992), un modelo hidrológico agregado para estimar la recarga en acuíferos. En 1999 se puso a punto la versión interactiva del código VISUAL BALAN v1.0 (Samper et al. 1999) que incorpora un entorno amigable tanto para la entrada de datos como para el postproceso de resultados, y también un mayor número de opciones para la realización del balance. BALAN y VISUAL BALAN han sido utilizados por numerosos técnicos e investigadores españoles y latinoamericanos en muy diversos ámbitos hidrológicos (Samper y García Vera, 1992, 1997). Algunas de las principales aplicaciones son:

- a) Planificación hidrológica: García Vera utilizó BALAN para la evaluación de los recursos hídricos en numerosas cuencas del Ebro (García Vera y Arqued, 2000; Samper y García Vera, 2000, 2004). Heredia y Murillo (2002) modelizaron una gran cantidad de cuencas en el Sureste de la Isla de Gran Canaria;
- b) Estimación de la recarga de acuíferos (Samper y García Vera, 1997; Samper, 1998);

- c) Evaluación de los recursos hídricos en zonas kársticas de Baleares, Cataluña y el País Vasco (Valls, 2001);
- d) Estudios hidrológicos para la gestión de residuos radiactivos de baja actividad y migración de uranio en el acuífero aluvial de Andújar (Samper y Carrera, 1995). También se utilizó VISUAL BALAN en estudios paleo-hidrológicos incluidos en el Proyecto Europeo PADAMOT;
- e) Caracterización hidrológica para el almacenamiento de residuos tóxicos en zonas de baja permeabilidad (Aliaga et al. 2004);
- f) Hidrología de zonas húmedas en Doñana (Samper et al. 1993), Monegros (Samper y García Vera, 1997; Castañeda y García Vera, 2004; Castañeda, 2004), Valiñas (Samper et al. 1999) y Gallocanta (Blasco et al. 2004);
- g) Hidrología de cuencas graníticas en Galicia (Samper et al. 1997, 2000, 2005);
- h) Hidrología de zonas de montaña (Samper et al. 2005);
- i) Evaluación de la recarga en acuíferos costeros y estudio de la intrusión salina (Romero et al. 2004);
- j) Evaluación de la influencia del embalse de Rules en el acuífero subyacente (García Aróstegui et al. 2001).

En este trabajo se presentan los desarrollos más recientes de actualización de VISUAL BALAN v2.0, especialmente los relacionados con el acoplamiento a un Sistema de Información Geográfica (GIS-BALAN).

2. Principales características de GIS-BALAN

GIS-BALAN evalúa los componentes hidrológicos en forma secuencial y realiza balances diarios de agua en el suelo edáfico, en la zona no saturada y en el acuífero. La precipitación neta (una vez descontada la intercepción), el agua de riego y la liberada en la fusión de la nieve constituyen las principales entradas al suelo. La infiltración se puede calcular mediante el método de Horton o el del Número de Curva del SCS (actualmente NRCS). La escorrentía superficial es calculada como la diferencia entre el agua suministrada al suelo y la infiltración. El agua infiltrada incrementa el contenido de humedad del suelo y contribuye a la evapotranspiración (ETR) y a la recarga en tránsito, que es la principal entrada de la zona vadosa. Los valores de evapotranspiración potencial (ETP) pueden ser introducidos por el usuario o calculados con uno de los siguientes métodos: Thornwaite, Blanney-Criddle, Makkink, Penman, Turc y Hargreaves. La ETR se calcula a partir de la ETP usando el método original de Penman-Grindley o bien variantes con leves modificaciones. Una característica destacable de GIS-BALAN es que puede considerar flujo preferente (rápido) a través del suelo. De esta forma, la recarga en tránsito puede tener dos componentes: a) Flujo preferente o recarga en tránsito directa que puede ocurrir a través de fisuras y/o macroporos, y que es igual a una fracción del agua suministrada al suelo; y b) Flujo darciano que obedece la Ley de Darcy y es más lento que el flujo preferente, y depende de la capacidad de campo y de la conductividad

hidráulica. Esta componente se denomina recarga en tránsito diferida.

GIS-BALAN incorpora un modelo conceptual de flujo en la zona no saturada según el cual el agua puede fluir horizontalmente y descargar hacia la atmósfera como interflujo (flujo hipodérmico) o percolar verticalmente hacia el acuífero alimentando a la recarga (percolación). Para el cálculo de la percolación se usa una formulación de la Ley de Darcy que tiene en cuenta la presencia de acuíferos colgados. En el balance en la zona no saturada hay una entrada que es la recarga en tránsito y dos salidas, el interflujo y la percolación. Los caudales de interflujo o flujo hipodérmico Q_h y de percolación Q_p se calculan mediante las siguientes expresiones (Samper et al. 1999):

$$Q_h = \alpha_h V_h \quad (1)$$

$$Q_p = K_v + \alpha_p V_h \quad (2)$$

donde V_h es el volumen de agua (por unidad de superficie) almacenada en la zona no saturada, α_h y α_p son los coeficientes de agotamiento para interflujo y percolación, respectivamente y K_v es la conductividad hidráulica vertical saturada. El coeficiente α_h está relacionado con la conductividad hidráulica horizontal y la porosidad drenable de la zona no saturada, K_h y m_{ns} , con la pendiente media del terreno i y con la distancia entre la cumbre y el fondo de la ladera, L , a través de:

$$\alpha_h = \frac{2k_h i}{L m_{ns}} \quad (3)$$

La formulación del flujo de percolación Q_p en (2) se basa en suponer que, debido a la existencia de horizontes poco permeables, en la zona no saturada pueden presentarse niveles colgados. En estas condiciones, el flujo vertical puede aproximarse mediante la Ley de Darcy:

$$Q_p = K_v \frac{(y_h + p)}{p} \quad (4)$$

donde y_h es la altura de lámina de agua en el acuífero colgado y p es la distancia entre la base del nivel colgado y el nivel freático regional. A partir de esta expresión y teniendo en cuenta que el volumen V_h y la altura y_h están relacionadas mediante $V_h = m_{ns} y_h$, se obtiene la Ecuación (2) en la que α_p viene dado por

$$\alpha_p = \frac{K_v}{p m_{ns}} \quad (5)$$

La ecuación del balance en la zona no saturada puede resolverse mediante métodos explícitos o implícitos (Samper et al. 1999).

La recarga constituye la entrada al acuífero. Para el balance de agua en el acuífero GIS-BALAN permite considerar modelos unicelulares o pluricelulares de celdas interconectadas. El flujo entre las celdas se calcula mediante un esquema explícito de diferencias finitas que aproxima la solución de la ecuación 1-D de flujo transitorio. La descarga subterránea es la salida natural del acuífero al cauce o a otro cuerpo de agua. El cambio del volumen de agua almacenada en el acuífero ΔV_a por unidad de superficie está relacionado con el cambio en el nivel

piezométrico Δh a través de la ecuación $\Delta V_a = S \Delta h$ donde S es el coeficiente de almacenamiento del acuífero.

El contenido de agua en los tres componentes se expresa en volumen por unidad de superficie (normalmente en mm).

La salida total de la cuenca se calcula como la suma de la escorrentía superficial, el interflujo y la descarga subterránea. El programa permite estimar automáticamente los parámetros del modelo mediante la minimización de una función objetivo (mínimos cuadrados) usando el algoritmo multidimensional de Powell (Samper et al. 1999). También permite realizar análisis de sensibilidad de los resultados a variaciones de los parámetros del modelo (Ares, 1999).

GIS-BALAN tiene interfaces que facilitan la introducción de datos y el postproceso de los resultados del modelo. Estas interfaces incluyen: a) Menús para introducir y almacenar la información; b) Tablas con valores recomendados de parámetros hidrológicos; y c) Gráficos y figuras de variables hidrológicas relevantes como la tasa de infiltración en función del contenido de humedad del suelo.

3. Desarrollos recientes

Se ha desarrollado un preprocesador como interfaz de entrada de GIS-BALAN. Partiendo de un modelo digital de elevaciones (MDE) y usando información geomorfológica almacenada en el SIG (Sistema de Información Geográfica) el preprocesador genera diversa información de entrada para el modelo como los límites de las subcuencas, la red de drenaje y los parámetros geomorfológicos (pendiente media) y los tipos y usos del suelo. El modelo puede manejar cuencas complejas con parámetros espacialmente distribuidos y tener en cuenta la propagación de la escorrentía superficial. El SIG proporciona el valor medio de cada parámetro para cada subcuenca delimitada por el preprocesador. Los datos meteorológicos de distintas estaciones son procesados en el SIG para crear mapas que describen su variabilidad espacial. Esta información es utilizada luego para obtener series de valores medios para cada subcuenca. Se establece la conectividad entre subcuencas y se calcula la acumulación de flujo para cada una de ellas. La Tabla 1 muestra la información de entrada del modelo que se obtiene del SIG. Los parámetros para modelizar la nieve, la recarga en tránsito directa y la ETR se estiman normalmente a partir de la calibración del modelo. En la Fig. 1 se muestra la ventana principal del preprocesador.

Se ha desarrollado también un postprocesador integrado a GIS-BALAN para procesar los resultados del modelo hidrológico.

Para satisfacer las necesidades de los usuarios de GIS-BALAN se han incorporado además las siguientes mejoras: a) Formatos estándar de datos meteorológicos y aforos usados comúnmente por las Confederaciones Hidrográficas; y b) Consideración de los procesos de precipitación, fusión y escorrentía nival (Samper y García Vera, 2000).

4. Aplicaciones de GIS-BALAN

GIS-BALAN se ha aplicado a cuencas Atlánticas en España y Portugal. La cuenca del río Valiñas está situada en las proximidades de la ciudad de La Coruña. Es una pequeña cuenca de 34 km² de superficie. El curso principal tiene una longitud de 12 km. La cuenca está situada sobre rocas de naturaleza granítica que presentan una alteración superficial que puede oscilar entre 5 y 20 m de espesor (Samper et al. 1997). El balance hidrológico se calculó entre los años hidrológicos 92/93 y 97/98. Se utilizó el método de Penman-FAO para el cálculo de la ETP. Primeramente se calibraron los parámetros del modelo utilizando sólo los datos de caudales medidos en la estación de aforos. Posteriormente, la calibración se realizó utilizando conjuntamente los datos de caudales y niveles medidos en un pozo somero. Se calibraron los siguientes parámetros: la capacidad de campo (su valor final resultó ser de 0.307), el espesor de suelo (1.4 m), la conductividad hidráulica vertical ($1.9 \cdot 10^{-6} \text{ m s}^{-1}$) y los coeficientes del método de Penman-Grindley para el cálculo de la ETR. El ajuste final obtenido es excelente, tanto para niveles freáticos como para caudales (Samper et al. 2000). En la Tabla 2 se muestran los valores medios anuales de las componentes hidrológicas en la cuenca del río Valiñas.

GIS-BALAN también ha sido utilizado para modelizar la hidrología de la cuenca de la laguna de Gallocanta. Se trata de una cuenca endorreica de 404 km² de superficie ubicada al suroeste de la Comunidad de Aragón. La altitud media de la cuenca es de 1 086 m.s.n.m., con un máximo de 1 451 m y un valor mínimo de 970 m en el fondo de la laguna (ver Fig. 2). La geología de la zona presenta una gran variabilidad de litologías pertenecientes a distintas edades. Los principales materiales aflorantes tienen una mayor abundancia de arenas, limos y arcillas del detrítico periglacial y de facies pertenecientes al Paleozoico.

Tabla 1. Principales parámetros de GIS-BALAN obtenidos del SIG.

<i>Tipo de información</i>	<i>Datos y parámetros de entrada del modelo</i>
Geográfica	Latitud
Hidrometeorológica	Precipitación y temperatura diarias, y opcionalmente horas de sol, humedad relativa y velocidad de viento
Suelo	Espesor, porosidad, capacidad de campo y conductividad hidráulica vertical (obtenidos de mapas geológicos y de suelo)
Vegetación y riego	Tipos de vegetación y cultivos y dotaciones de riego
Intercepción	Tipo de vegetación y altura media de la planta
Escorrentía	Parámetros de Horton o número de curva del SCS para cada subcuenca (estimado a partir del MDE y mapas de suelos)
Zona no saturada	Conductividad hidráulica, coeficientes de agotamiento de interflujo y percolación (estimados a partir de mapas geológicos)
Acuífero	Coefficientes de agotamiento y almacenamiento y transmisividad (obtenidos de la combinación de información hidrogeológica y de aforos)

Se han definido seis subcuencas (García Vera, 2002). Dos de las subcuencas relacionadas con la laguna de Gallocanta vierten subterráneamente a la laguna: son los afloramientos de los acuíferos detríticos y carbonatados. La identificación de estas unidades se obtuvo a partir del mapa

geológico. Las otras cuatro subcuencas modelizadas con VISUAL BALAN sólo vierten superficialmente a la laguna.

El balance hidrometeorológico se calculó entre los años hidrológicos 1964/65 y 2003/04. En ese periodo se dispone de los datos de precipitación diarios de 43 estaciones meteorológicas del INM y de la estación automática de Gallocanta. La precipitación media anual en la cuenca es 435 mm. Las series de precipitación diaria para cada subcuenca fueron obtenidas a partir de los valores mensuales. Éstos a su vez se calcularon para cada celda del MDT, ponderando cada estación en función del inverso de la distancia al cuadrado, y corrigiendo además según una recta de regresión para considerar la altitud. Los valores medios para cada subcuenca se obtienen promediando los valores en las celdas situadas dentro de cada subcuenca. El paso de valores mensuales de la subcuenca a valores diarios se hizo aplicando a los primeros la variabilidad temporal de la estación más cercana al centro de la subcuenca con datos diarios completos en el mes de cálculo.

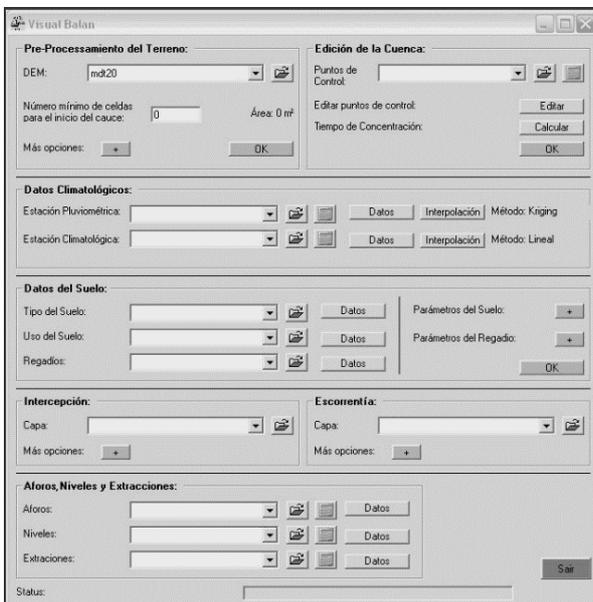


Fig. 1. Ventana principal del preprocesador de GIS-BALAN. En cada cuadro temático se especifican las capas del SIG usadas para calcular los parámetros del modelo y las opciones del cálculo.

La Fig. 3 muestra las zonas de la cuenca en las que los parámetros del modelo se consideran constantes (zonas homogéneas). En cada una de estas zonas GIS-BALAN calcula las principales componentes del balance. El mapa de zonas homogéneas se obtiene con el preprocesador de GIS-BALAN.

Para la calibración de los parámetros del modelo se consideraron las series de datos de dos estaciones de aforos localizadas en las subcuencas de Santed y de Tornos, dos hidrogramas de niveles piezométricos representativos de la subcuenca carbonatada y de otro punto de medición de niveles piezométricos de la subcuenca detrítica. Se ha hecho un completo análisis de sensibilidad para conseguir el mejor ajuste de los parámetros del modelo. Los parámetros usados en el análisis de sensibilidad han sido el espesor del suelo, los coeficientes de la recarga en tránsito directa, los coeficientes de la curva de infiltración del método de Horton, el coeficiente de agotamiento del flujo hipodérmico y del flujo subterráneo. Se ha logrado un ajuste razonablemente bueno que permite reproducir los valores medios y las tendencias de las series medidas de niveles piezométricos y de caudales y de las aportaciones a la laguna. En la Tabla 3 se muestran los resultados medios anuales del balance en la cuenca y en las subcuencas.

Tabla 2. Valores medios anuales y totales calculados con GIS-BALAN en la cuenca del río Valiñas.

	Media anual en mm	Media anual en Hm ²	Total en mm	Total en Hm ²			
Precipitación	1124	39	6746	231			
Recarga en tránsito	607	21	3644	125			
Flujo preferente	0	0					
Evapotranspiración potencial	951	33					
Evapotranspiración real	386	13	2318	80			
Dotación	0	0					
Escorrentía	10	0	60	2			
Flujo hipodérmico	497	17	2983	102			
Caudal subterráneo	97	3	582	20			
Caudal total	604	21	3625	124			
Recarga al acuífero	110	4	661	23			
Intercepción	113	4	679	23			
Precipitación nival	0	0	0	0			
Agua retenida en la nieve	0	0	0	0			
Altura de la nieve	0	0	0	0			
Escorrentía nival	0	0	0	0			
MEDIAS MENSUALES							
	en mm	Recarga total	Recarga diferida	Precipitación	ETP	ETR	Escorrentía
ENERO	134	0	145	27	24	2	
FEBRERO	87	0	124	37	27	0	
MARZO	72	0	73	70	35	0	
ABRIL	43	0	84	97	44	2	
MAYO	35	0	109	111	54	0	
JUNIO	26	0	38	139	46	0	
JULIO	12	0	31	140	39	0	
AGOSTO	4	0	23	128	22	0	
SEPTIEMBRE	12	0	98	86	29	4	
OCTUBRE	27	0	90	60	28	0	
NOVIEMBRE	64	0	145	32	22	1	
DICIEMBRE	92	0	163	24	17	2	

Tabla 3. Resultados medios anuales en la cuenca de la laguna de Gallocanta.

	Total en la Cuenca		Subcuenca carbonatada		Subcuenca detrítica		Subcuenca de los Pozuelos		Subcuenca de Santed		Subcuenca de Tornos		Subcuenca de Zaida	
	mm	hm ³	mm	hm ³	mm	hm ³	mm	hm ³	mm	hm ³	mm	hm ³	mm	hm ³
Precipitación	435	166.2	405	14.7	424	40.2	440	60.7	453	11.4	452	16.2	441	23.0
Recarga en tránsito	36	13.7	68	2.5	29	2.7	34	4.7	56	1.4	14	0.5	37	1.9
Flujo preferente	9	3.5	22	0.8	9	0.8	9	1.3	6	0.2	1	0.0	9	0.5
ETP potencial	669	255.7	669	24.2	670	63.6	666	91.8	677	17.0	672	24.1	672	35.0
ETP real	397	151.6	335	12.1	394	37.4	404	55.7	397	10.0	430	15.4	403	21.0
Dotación riego	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Escorrentía sup.	2	0.8	2	0.1	1	0.1	2	0.2	1	0.0	9	0.3	2	0.1
Flujo hipodérmico	16	6.2	34	1.2	15	1.4	17	2.4	6	0.1	1	0.0	18	1.0
Caudal subterráneo	20	7.5	33	1.2	14	1.3	17	2.3	50	1.3	13	0.4	18	0.9
Caudal total	38	14.5	70	2.5	30	2.8	36	5.0	56	1.4	23	0.8	38	2.0
Recarga al acuífero	20	7.6	34	1.2	14	1.3	17	2.3	50	1.3	12	0.4	18	0.9
Intercepción	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0
Precipitación nival	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0

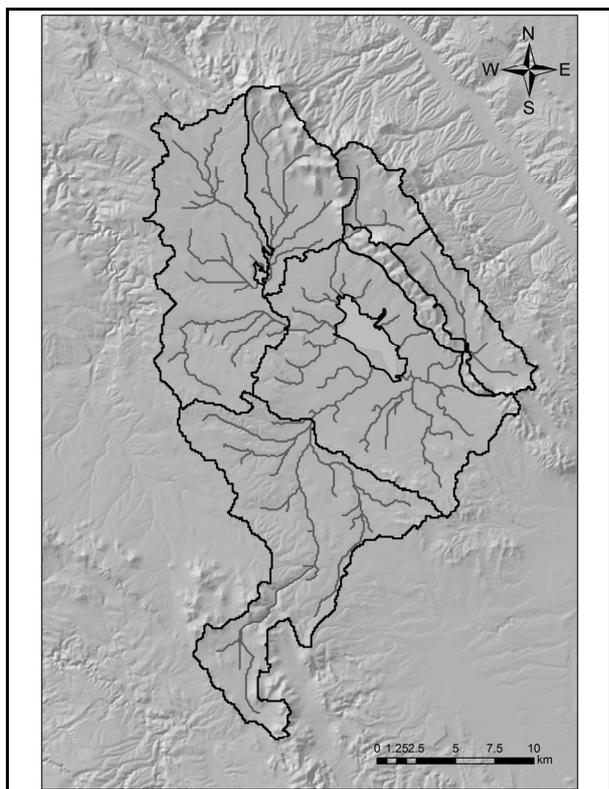


Fig. 2. Mapa topográfico e hidrográfico del modelo hidrológico de la laguna de Gallocanta. Se indican las subcuencas modelizadas con GIS-BALAN.

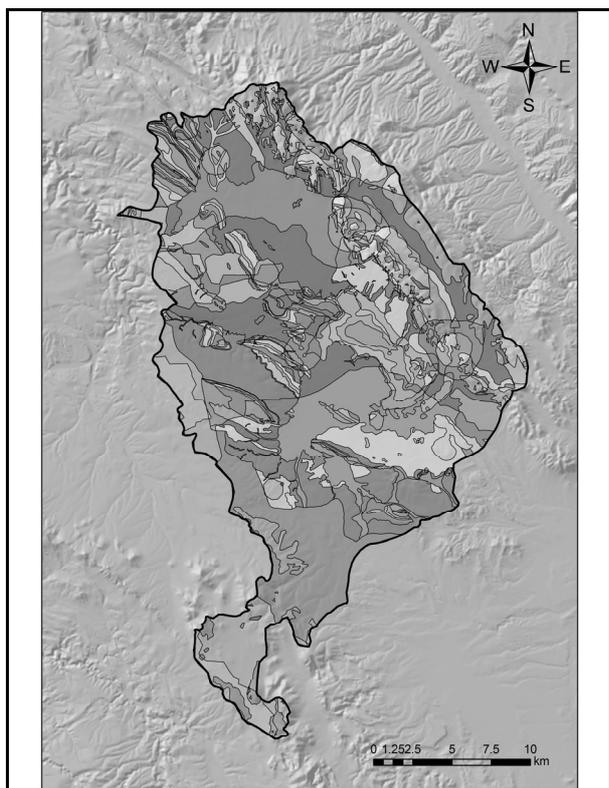


Fig. 3. Mapa de zonas homogéneas del modelo hidrológico de la laguna de Gallocanta. En estas zonas los parámetros del modelo se consideran constantes.

5. Conclusiones

Se han presentado los principales aspectos de GIS-BALAN. Se trata de un modelo hidrológico distribuido para la evaluación de los recursos hídricos en cuencas complejas. Los desarrollos más recientes han sido descritos incluyendo el acoplamiento de VISUAL BALAN v2.0 con un Sistema de Información Geográfica. Además del acoplamiento con el SIG, GIS-BALAN incluye mejoras sustanciales en las interfaces de entrada de datos y postproceso de resultados.

Los nuevos desarrollos han sido ilustrados en dos cuencas españolas: la del río Valiñas y la de la laguna de Gallocanta. Hay que destacar que en cuencas pequeñas, como la del río Valiñas, el paso del análisis agregado al distribuido no mejora sustancialmente los resultados. Sin embargo, en cuencas más extensas y complejas, como la de la laguna de Gallocanta, es necesaria una discretización espacial más detallada para poder reproducir más adecuadamente los procesos hidrológicos.

Agradecimientos. Este trabajo ha sido financiado por un Proyecto de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (Proyecto REN2003-8882). El desarrollo de VISUAL BALAN fue financiado por la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (ENRESA). Una gran parte de las mejoras de VISUAL BALAN v2.0 se ha hecho en el marco de proyectos de investigación conjuntos entre la Confederación Hidrográfica del Ebro y la Universidad de La Coruña (referencia 2000-PH17-I). Agradecemos a todos los que han contribuido a las sucesivas mejoras del código desde la fase inicial de BALAN hasta GIS-BALAN.

Referencias

- Aliaga, R., Sahuquillo, A. y Custodio, E. 2004. Estimación de parámetros hidrogeológicos en una formación de baja permeabilidad. IV Asamblea Hispano-Portuguesa de Geofísica y Geodesia, Figueira Da Foz. 735-736.
- Ares, J. 1999. Desarrollo y aplicación de modelos interactivos de balance hidrológico. Tesina. E.T.S. de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de la Coruña. 314 pp.
- Blasco, O., San Román, J. y García Vera, M.A. 2004. Modelado numérico de flujo de la Unidad Hidrogeológica de Gallocanta (Cuenca del Ebro). VIII Simposio de Hidrogeología. Zaragoza. Ed. Asociación Española de Hidrogeólogos (AEH). 513-523.
- Castañeda, C. 2004. Las saladas del sur de Monegros: facies, régimen hídrico y estado actual. Tesis doctoral, CITA-DGA, Zaragoza.
- Castañeda, C. y García Vera, M.A. 2004. Balance de agua en medios semiáridos: aplicación a tres saladas de Monegros. VIII Simposio de Hidrogeología. Zaragoza. Ed. Asociación Española de Hidrogeólogos (AEH). 205-215.
- Custodio, E., Llamas, M. R. y Samper, J. (ed.). 1997. La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica. Seminario de la AIH-GE. Las Palmas de Gran Canaria. Madrid. Ed. Instituto Tecnológico Geominero de España. 455 pp.
- Heredia, J. y Murillo, J. 2002. Balance hídrico y estimación de la recarga mediante modelación numérica en pequeñas cuencas del sector suroriental de la isla de Gran Canaria. XI Congreso Internacional de Industria, Minería y Metalurgia. Zaragoza. 19 pp.
- García-Aróstegui, J., Heredia, J., Murillo, J., Rubio-Campos, J., González-Ramón, A. y López-Geta, J. 2001. Primera aproximación mediante modelización al análisis de la influencia del embalse de Rules en el régimen hidrológico del acuífero de Motril-Salobreña (Granada). V Simposio sobre el agua en Andalucía, Almería. Volume II, sección: Hidrogeología, 15 pp.

- García Vera, M.A. 2002. Balance en la Laguna de Gallocanta en el período 1/1970-12/2001. Informe inédito para la Confederación Hidrográfica del Ebro. Zaragoza. 137 pp.
- García Vera, M.A. y Arqued, V. 2000. Evaluación de los recursos hídricos subterráneos en el dominio hidrogeológico Alto Jalón – Alto Jiloca. *Geotemas* 1 (2), Madrid. 87-91.
- Romero, P., Elorza, F., Murillo, J., Hornero, J. y Hernández, L. 2004. Estimación de la recarga en el acuífero del cabo Roig (Alicante). VIII Simposio de Hidrogeología. Zaragoza. Ed. A.E.H., tomo XXVI, sección: Simulación Matemática.
- Samper, J. 1998. Evaluación de la recarga por la lluvia mediante balances de agua: Utilización, Calibración e Incertidumbres. *Boletín Geológico y Minero*, vol. 109-4. 31-54.
- Samper, J. y Carrera, J. 1995. Numerical Modelling of Remedial Actions for an Uranium Mill tailings in Spain: from model construction to prediction uncertainty, En: *Groundwater Quality: Remediation and Protection*. IAHS, publicación nº 225. 299-310.
- Samper, J. y García Vera, M.A. 1992. Manual de usuario del programa BALAN_8. Dpto. de Ingeniería del terreno. E. T. S. de Ingenieros de Caminos. UPC. Barcelona.
- Samper, J. y García Vera, M.A. 1997. Estimación de la recarga producida por la lluvia y los excedentes de riego mediante balances diarios de agua en el suelo: Experiencias en diferentes zonas climáticas. En: *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la Planificación Hidrológica*. Las Palmas de Gran Canaria. AIH-GE. 367-379.
- Samper, J. y García Vera, M.A. 2000. Metodología para la cuantificación de los aprovechamientos potenciales de la cuenca del Ebro mediante balances de agua. Asistencia técnica de la UDC a la Confederación Hidrográfica del Ebro. Referencia 2000-PH-17-I. 84 pp.
- Samper, J. y García Vera, M.A. 2004. Visual-Balan, un modelo interactivo de balance hidrológico: estado actual y desarrollos futuros. VIII Simposio de Hidrogeología, Zaragoza, 18-22 de octubre de 2004. 595-604.
- Samper, J., Soriano, G. y Molinero, J. 1997. Las aguas subterráneas en Galicia: Resultados en la cuenca piloto del río Valiñas. *Hydrogeology of Hard Rocks*, Editor AIH-GE. 149-157.
- Samper, J., Poncela, R., Custodio, E. y García Vera, M.A. 1991. Estimation of infiltration recharge from a combination of meteorological and hydrogeological data. En: XXIII International IAH Congress on Aquifer Overexploitation, Tenerife International Association of Hydrogeologists. Vol. 1, pp. 85-88.
- Samper, J., Huguet, Ll., Ares, J. y García Vera, M.A. 1999. Manual del usuario del programa VISUAL BALAN v.1.0: Código interactivo para la realización de balances hidrológicos y la estimación de la recarga. *Publicación Técnica de ENRESA nº 5/99*, Madrid. 205 pp.
- Samper, J., Huguet, Ll., Ares, J. y García Vera, M.A. 2000. Modelos interactivos de balance hidrológico: aplicación a cuencas de Galicia. *Jornadas hispano-lusas sobre las aguas subterráneas en el noroeste de la península ibérica*. A Coruña. AIH-GE. 211-218.
- Samper, J., García Vera, M.A., Pisani, B., Alvares, D., Espinha Marques, J., Varela A., y Losada, J.A. 2005. Hydrologic models and Geographic Information Systems for water resources evaluation: Application of GIS-BALAN to Atlantic basins in Spain and Portugal. En: *The Fourth Inter-Celtic Colloquium on Hydrology and Management of Water Resources*. Guimaraes, Portugal. IAHS. 12 pp.
- Valls, M. 2001. Caracterización de la recarga y estimación del almacenamiento en el acuífero kárstico de Troya (Guipúzcoa) mediante la utilización del modelo VISUAL BALAN y la realización de balances hídricos generales. *Tesina de máster*. UPC, Barcelona.