

Modelos interactivos de balance hidrológico

J. Samper¹, Ll. Huguet¹, J. Ares¹ y M. A. García-Vera²

1. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Universidad de la Coruña, Campus de Elviña s/n, 15192 La Coruña; samper@iccp.udc.es
2. Confederación Hidrográfica del Ebro. Zaragoza

RESUMEN. Para la realización de balances hidrológicos con una precisión adecuada es necesario recurrir a modelos numéricos. En este trabajo se presenta un código recientemente desarrollado para la realización simultánea de balances hidrológicos diarios en el suelo edáfico, la zona no saturada y el acuífero, VISUAL BALAN V 1.0 (Samper et al., 1999). Se trata de un código totalmente interactivo en un entorno afable (user-friendly) tanto para la entrada de datos como para el postproceso de resultados que incorpora un gran número de opciones para la realización del balance. El código contempla la opción de realización de análisis de sensibilidad a los parámetros del modelo. Es de destacar la capacidad del código para la estimación automática de cualquier número de parámetros mediante la minimización de los errores de ajuste a datos disponibles de niveles piezométricos y aforos. El potencial del código se ilustra mediante su aplicación a una pequeña cuenca situada cerca de La Coruña.

ABSTRACT. In order to achieve adequate accuracy, water balance equations are solved using numerical models. Here we present VISUAL BALAN V 1.0 (Samper et al., 1999), a recently developed code for performing daily water balance in the soil, the unsaturated zone and the aquifer. It is a fully interactive user-friendly code which incorporates a large number of options such as sensitivity analyses and automatic parameter estimation. The latter is performed by minimizing a least-squares objective function which match of computed heads and flow rates to measured water levels in wells and flow rates in rivers. The capabilities of the code are illustrated in a small basin in northern Spain near La Coruña.

1.- Introducción.

Todo estudio hidrológico, tanto de superficie como subterráneo, requiere la realización de un balance en las diferentes componentes del ciclo hidrológico. Para realizarlo con detalle, las ecuaciones del balance (conservación de la masa de agua), deben resolverse de forma numérica utilizando programas de cálculo numérico. Por otro lado, la estimación de la recarga de los acuíferos requiere utilizar métodos de balance (Custodio et al., 1997).

Los métodos de balance presentan una serie de ventajas

tales como: (1) la disponibilidad de datos (pluviometría, niveles piezométricos, caudales, ..., etc), (2) la facilidad y rapidez de aplicación, (3) el reducido coste de realización, (4) el hecho de que suelen considerar todas las componentes, fuentes y sumideros de agua y (5) su aplicabilidad a todo tipo de fuentes de recarga. Por ello, en muchos casos son los únicos métodos viables. Los resultados de los balances deben ser contrastados y calibrados con datos de oscilaciones freáticas y de aforos en los puntos de salida de la cuenca. También es recomendable comprobar su coherencia con los resultados obtenidos con métodos hidroquímicos (balance de cloruros), 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 ETR.

En este trabajo se presenta un código para la realización de balances hidrológicos diarios en el suelo edáfico, la zona no saturada y el acuífero, VISUAL BALAN V 1.0 (Samper et al., 1999), desarrollado por el Grupo de Hidrología Subterránea de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de la Universidad de La Coruña. Calcula el balance diario de agua en una cuenca partiendo de los datos de precipitación diaria, proporcionando los resultados para cada una de las componentes del balance. El código es totalmente interactivo tanto para la entrada de datos como para el postproceso de resultados. Además tiene incorporadas las opciones de: (1) realización de análisis de sensibilidad a los parámetros del modelo y (2) estimación automática de la mayoría de los parámetros del modelo mediante la minimización de los errores de niveles piezométricos y aforos. Además de una descripción del código se presenta su aplicación a la estimación de la recarga en una pequeña cuenca piloto situada cerca de La Coruña.

2.- El código VISUAL BALAN.

A efectos del flujo de agua, dentro del medio subterráneo VISUAL BALAN considera tres componentes de propiedades claramente diferentes:

1. El suelo edáfico o zona radicular. En él se produce la infiltración del agua de lluvia (y la aportada al suelo de

forma artificial en zonas de regadío) y tienen lugar los procesos de evaporación y transpiración. Su espesor es variable dependiendo del tipo de suelo y de vegetación. Los flujos de salida son la evapotranspiración y el flujo vertical descendente, que supone la recarga en tránsito y que algunos autores denominan lluvia o precipitación eficaz (Samper y García Vera, 1992).

2. La zona parcialmente saturada o zona vadosa. Su espesor es muy variable de unas zonas a otras. En esta zona pueden existir acuíferos colgados de carácter efímero que pueden dar lugar a un flujo subhorizontal (aquí denominado flujo hipodérmico). El flujo vertical descendente que sale de esta zona constituye la recarga al acuífero.
3. El acuífero o zona permanentemente saturada.

El movimiento o flujo de agua entre estas componentes se resume en el esquema de la Figura 1. La precipitación P (una vez descontada la interceptación) se distribuye entre escorrentía superficial (E_s) e infiltración (I). De esta última, una parte vuelve a la atmósfera por evapotranspiración (ETR), otra parte se utiliza para aumentar la reserva de agua en el suelo y el resto constituye recarga en tránsito (P_e). La recarga en tránsito es la entrada de agua a la zona vadosa. Dentro de esta zona el agua puede fluir lateralmente a la atmósfera en forma de flujo hipodérmico (Q_h) o bien percolar verticalmente hacia el acuífero (Q_p). Esta percolación es por tanto la recarga al acuífero. La descarga subterránea (Q_s) es la salida natural del acuífero hacia los cauces y las masas de agua superficial. Las variables de estado en cada una de las tres componentes son los volúmenes de agua almacenados, generalmente expresados como altura equivalente de agua (volumen por unidad de superficie) en mm. La altura equivalente de agua en el suelo se suele expresar como el producto del contenido volumétrico de humedad θ por el espesor de suelo b_s . La cantidad de agua en la zona vadosa es V_h .

El programa VISUAL BALAN V. 1.0 realiza balances diarios de agua de forma secuencial en el suelo edáfico, en la zona no saturada y en el acuífero. Los términos fundamentales del balance son las entradas por precipitación y riegos, las salidas por interceptación, escorrentía superficial, evapotranspiración, flujo hipodérmico y flujo subterráneo, y variación del contenido de humedad del suelo y del nivel de agua en el acuífero. El programa trabaja con años hidrológicos teniendo en cuenta la posible presencia de años bisiestos. Evalúa cada uno de los términos del balance de forma secuencial, comenzando por la precipitación y las dotaciones de riegos, que son datos conocidos, continuando con la interceptación (calculada mediante los métodos de Horton o de Singh), la escorrentía superficial (obtenida a través de la ley de Horton o mediante el método del Número de Curva de la U. S. Soil Conservation Service) y la evapotranspiración real, que es función de las variables anteriores y terminando con la recarga por infiltración. El balance se realiza por periodos de tiempo de duración igual a un día.

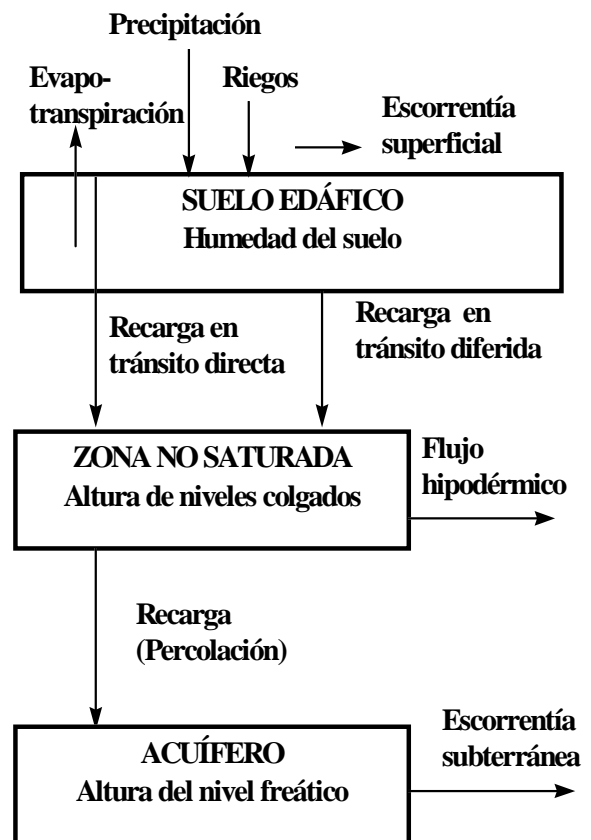


Fig. 1. Representación esquemática del balance de agua en el suelo, en la zona no saturada y en el acuífero en la que se indican los principales procesos que tienen lugar.

La evapotranspiración potencial se puede calcular mediante seis posibles métodos: Thornthwaite, Blaney-Criddle, Makkink, Penman, Turc y datos proporcionados por el usuario.

Para el cálculo de la ETR a partir de la ETP se incorporan un total de cuatro métodos que incluyen el de Penman-Grindley, un método en el que la fracción ETR/ETP es una función lineal del déficit hídrico del suelo, un tercer método en el que esta fracción es una función exponencial y una versión modificada del método de Penman-Grindley.

La recarga en tránsito total se compone de dos términos. El primero de ellos responde al mecanismo de flujo preferente (recarga en tránsito directa) a través de fisuras, macroporos, raíces, etc. En este mecanismo la recarga es directamente proporcional al agua suministrada al suelo. Este flujo puede operar cuando: (a) el suelo está anegado de agua, (b) cuando el suelo está muy seco o c) cuando está muy húmedo. El segundo término responde al mecanismo de recarga en tránsito diferida por flujo darcyano a través de los poros. Este flujo es más lento que el anterior, y está limitado por la conductividad hidráulica vertical del suelo en condiciones de saturación. El programa VISUAL BALAN V.1.0 permite calcular esta componente según tres posibles métodos en los que la recarga es función de la cantidad de agua existente en el suelo.

Además del balance en la zona edáfica, VISUAL-

BALAN realiza el balance de agua en la zona no saturada. La recarga en tránsito constituye la entrada de agua a la zona no saturada. Una vez actualizado el volumen en esta zona teniendo en cuenta la entrada P_e , los caudales de salida horizontal por flujo hipodérmico Q_h y vertical por percolación Q_p se calculan mediante las siguientes expresiones (Samper, 1998):

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

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

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 flujo hipodérmico y para la percolación, respectivamente y K_v es la conductividad hidráulica vertical del medio no saturado. La expresión para el flujo hipodérmico es similar a la propuesta por otros autores. De hecho 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) responde a 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

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

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

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

VISUAL BALAN ofrece al usuario la posibilidad de realizar el balance en la zona no saturada mediante un esquema explícito y otro implícito. En el acuífero subyacente el programa resuelve la ecuación diferencial del flujo unidimensional en un acuífero utilizando el método de diferencias finitas con un esquema explícito y un número de celdas a elección del usuario. Esto permite calcular los

niveles piezométricos a diferentes distancias del punto de desagüe, que se pueden comparar con niveles reales. Asimismo, el programa obtiene los caudales de descarga subterránea.

La escorrentía total se obtiene como la suma del flujo hipodérmico, el subterráneo y la escorrentía superficial. Este caudal se puede comparar con las medidas realizadas en estaciones de aforos. El código considera la posibilidad de restituir los valores medidos al régimen natural.

El programa presenta un algoritmo para la estimación automática de los parámetros del modelo basado en el método de minimización multidimensional de Powell (Press *et al.*, 1989). Dicho algoritmo busca el mínimo de una función objetivo que mide las diferencias cuadráticas ponderadas entre los valores medidos y calculados de aforos y niveles piezométricos. También permite realizar análisis de sensibilidad de los resultados a variaciones de los parámetros del modelo.

El balance realizado supone que el suelo es agregado, y que el comportamiento es el mismo en cualquier punto de la cuenca hidrográfica. De esta manera el balance será más representativo cuantas menos heterogeneidades presente la cuenca y cuanto menor sea su tamaño. Para compensar este efecto, el programa permite la subdivisión de la cuenca de estudio en varias subcuencas de propiedades diferentes, donde se realizan balances independientes cuyos resultados son combinados a posteriori para obtener los valores correspondientes a la cuenca total. Igualmente, se permite el trabajo con varias estaciones hidrometeorológicas para suplir lagunas de datos o realizar medias ponderadas con las distintas series de datos.

Una de las principales novedades de VISUAL BALAN V. 1.0 radica en que cuenta con una interfaz de entrada y salida organizada en ventanas para el proceso de entrada de datos y de análisis de los resultados. De este modo, se configura un código interactivo, que permite una ágil entrada de datos y la posibilidad de interpretar cómodamente los resultados. Toda la información requerida por el usuario se presenta en pantalla mediante gráficos y figuras, que ilustran el comportamiento de las variables del proceso. Esta facilidad para introducir o acceder a la información, facilita enormemente los trabajos para la calibración del modelo, sean manuales o realizadas mediante ajuste automático.

La interfaz de entrada está estructurada de manera que las variables de entrada son agrupadas en familias definidas en función del método de cálculo empleado y del elemento del balance para cuya obtención dichas variables son necesarias. Esta interfaz permite una entrada de datos sencilla y estructurada. En primer lugar, el usuario debe indicar el número de subcuencas dentro de la cuenca de trabajo, así como el número de puntos de medida de niveles y de estaciones meteorológicas y de aforos existentes.

Como ejemplo de algunas de las ventanas del código, en la Figura 2 se adjunta la ventana de entrada de datos para la zona no saturada.

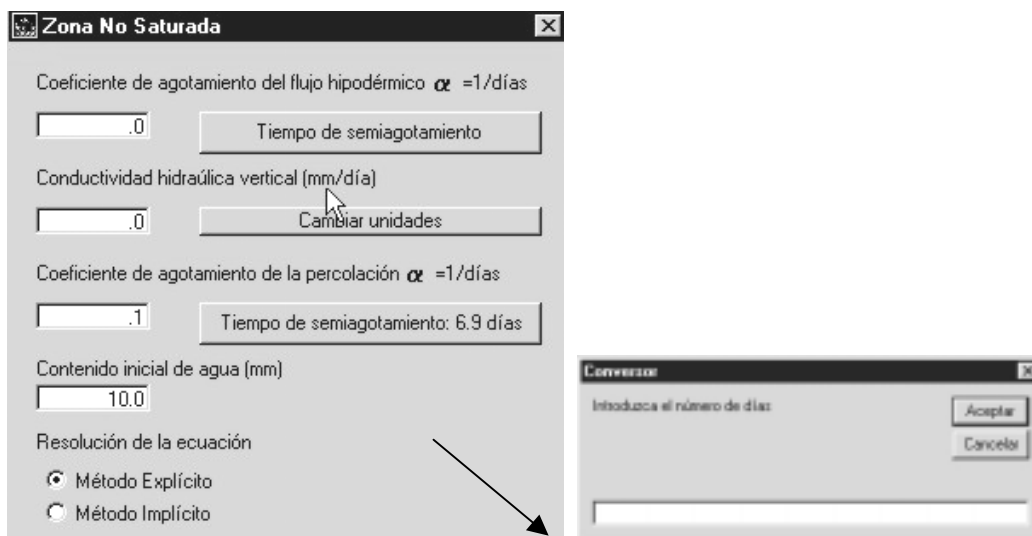


Fig. 2. Pantalla de VISUAL BALAN utilizada para definir los parámetros de la zona no saturada.

La interfaz para el postproceso de resultados permite acceder de forma rápida a todas las series de resultados que ofrece el programa. Para ello, se presentan por defecto los resultados globales medios anuales de la cuenca total para cada una de las componentes del balance, así como un histograma de los valores de la precipitación, la ETP y la ETR y un diagrama sectorial donde se muestran los porcentajes de cada componente respecto al total. También se puede tener acceso a los resultados totales acumulados, disponiendo de ambos resultados tanto en mm como en hm^3 (ver Fig. 3).

Por otro lado, en el apartado de resultados generales diarios, mensuales o anuales, se presenta por defecto un triple gráfico con posibilidad de ZOOM, donde se dispone de las series de precipitación, caudal total, niveles piezométricos y escorrentía superficial (Figura 4). Mediante la opción *Combinar*, el usuario puede construir cualquier gráfico (sea de evolución diaria, mensual o anual), variando a su gusto las series de resultados a representar.

Las opciones de análisis de sensibilidad y de ajuste automático disponen de salidas específicas. La primera presenta los gráficos de evolución de los resultados de cada componente del balance frente a variaciones de los parámetros, así como las diferentes series de caudales y niveles asociadas. La salida del ajuste automático muestra un gráfico de evolución de la función objetivo minimizada, así como los valores finales de los parámetros.

El programa VISUAL BALAN V.1.0 presenta también gráficos comparativos entre los niveles medidos y calculados para cada punto de medida de niveles y entre los caudales calculados y medidos, para cada estación de aforos. De esta forma, puede apreciarse la bondad de los ajustes obtenidos así como sus deficiencias más acusadas. Pueden editarse los resultados numéricos correspondientes a

todos los gráficos presentados en pantalla. También se pueden editar las propiedades de los gráficos (intervalo de fechas a presentar, rango de los ejes verticales, posición de la leyenda, adición o eliminación de series de datos, color y formato de las líneas de evolución, etc,...). Por tanto, las posibilidades de post-proceso que ofrece VISUAL BALAN V.1.0 son muy amplias, permitiendo al usuario disponer de una visión gráfica y directa de los resultados del balance.

3.- Aplicación a la cuenca del Valiñas.

El código VISUAL BALAN y sus predecesores, BALAN (Samper y García Vera, 1992) han sido aplicados en numerosas cuencas bajo condiciones hidroclimáticas y geológicas muy diversas (Samper y García Vera, 1997). Aquí se presenta la aplicación a la cuenca del río Valiñas, afluente del río Mero, situada en las proximidades de la ciudad de La Coruña. Se trata de una pequeña cuenca de 34 km^2 de superficie. El curso principal tiene una longitud de 12 km, casi todo él instalado sobre rocas de naturaleza granítica, correspondiendo la zona más oriental a terrenos metamórficos (esquistos de la Serie de Órdenes). Estas rocas presentan un regolito de alteración superficial denominado jabre, de granulometría arenosa - limosa, con espesores que pueden oscilar entre 5 y 20 m (Samper et al., 1997).

En la cuenca del río Valiñas existen dos sistemas de circulación subterránea. En el más superficial, constituido por el regolito, presenta flujos locales de poco recorrido y tiempos cortos de renovación. Por debajo se encuentra el granito sin alterar, por el cuál el agua discurre a través de fracturas.

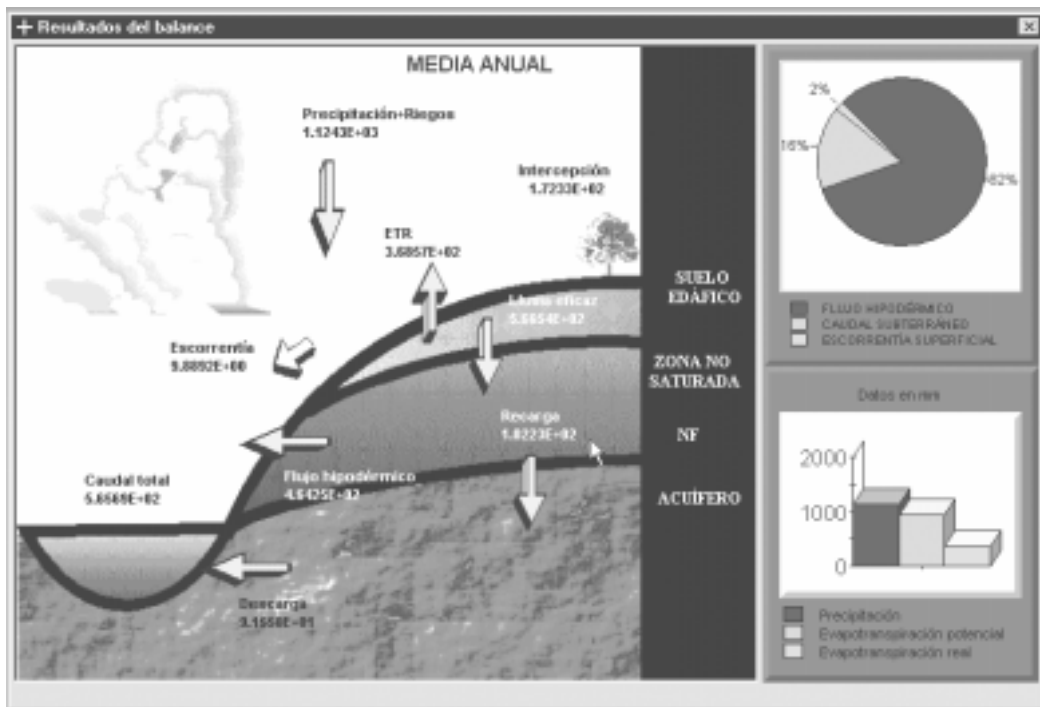


Fig. 3. Pantalla de VISUAL BALAN con los resultados medios anuales del balance en la cuenca del Valiñas (La Coruña)

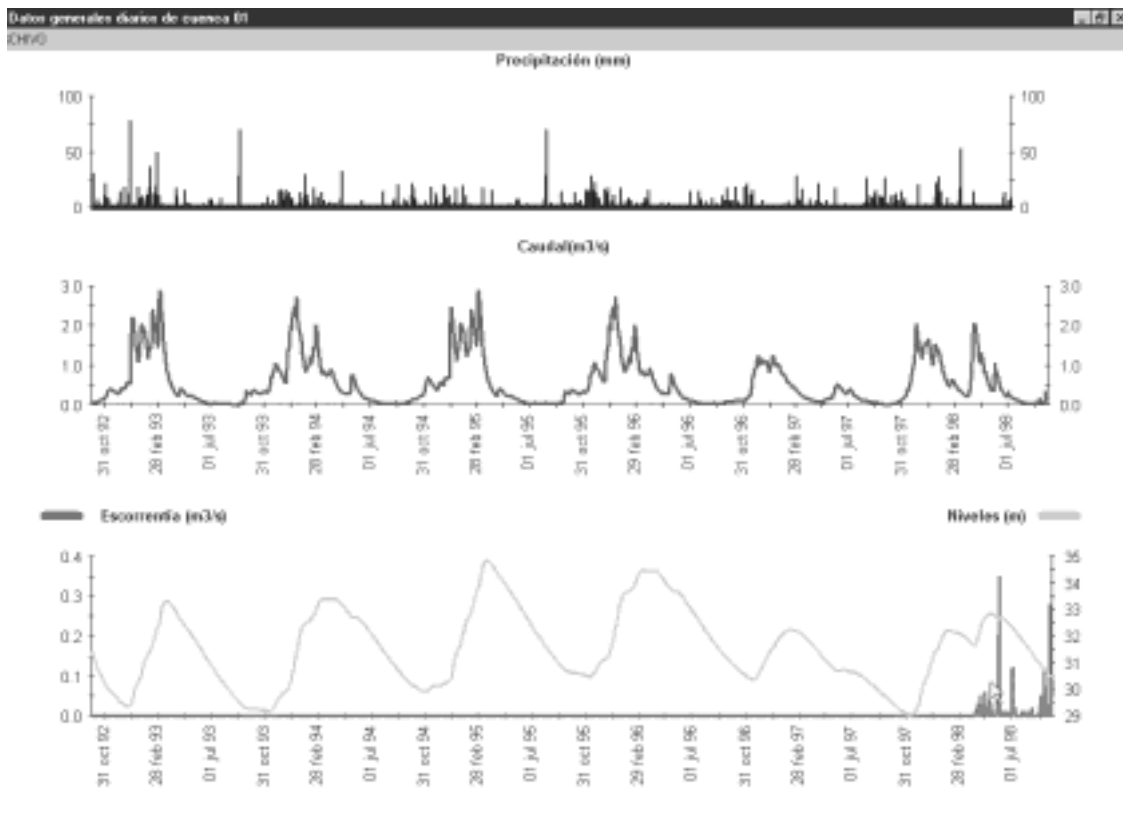


Fig. 4. Pantalla de VISUAL BALAN de resultados diarios correspondientes a la cuenca del Valiñas (La Coruña). Se muestran los valores de la precipitación, el caudal total, la escorrentía superficial y las oscilaciones de niveles freáticos.

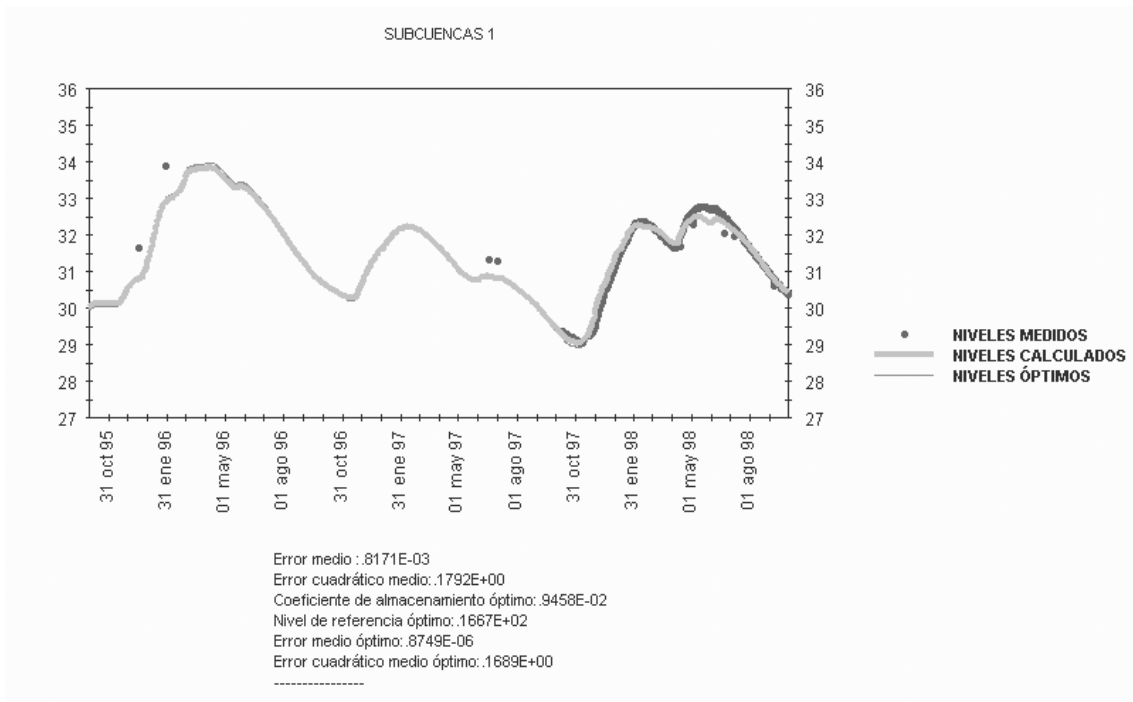


Fig. 5. Evolución temporal de niveles medidos (símbolos) y calculados (líneas) con VISUAL BALAN en la cuenca del Valiñas (La Coruña).

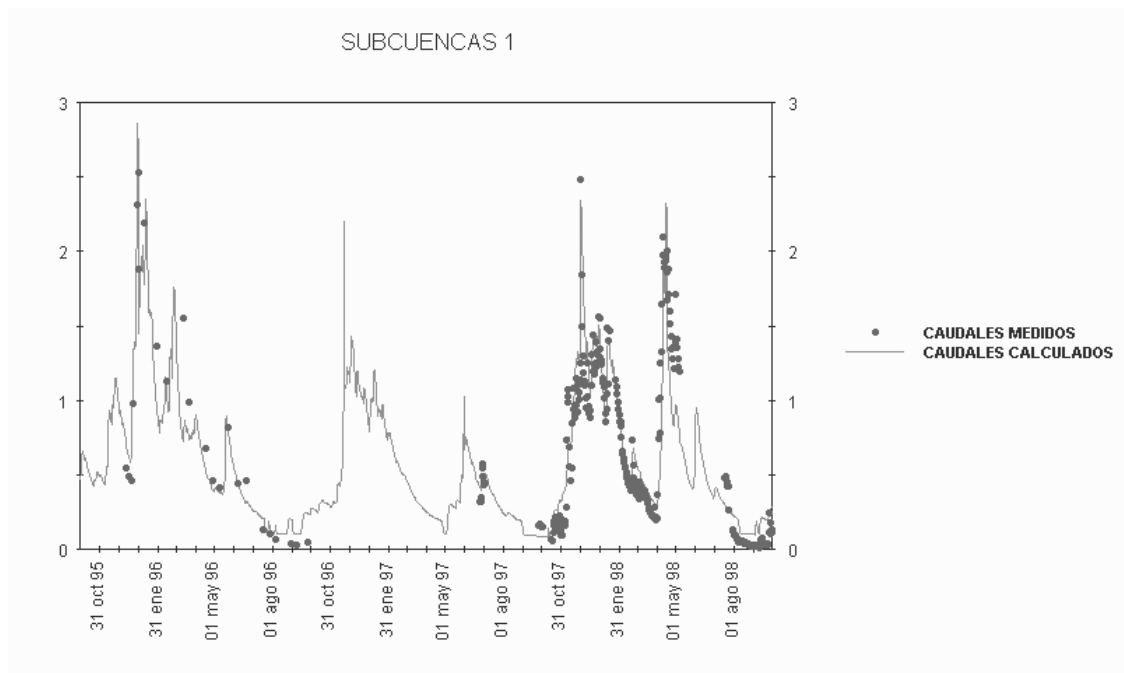


Fig. 6. Evolución temporal de los caudales calculados (líneas) y medidos (símbolos) en la cuenca del Valiñas (La Coruña).

Para la realización del balance hidrológico entre los años hidrológicos 92/93 y 97/98, se partió de una estimación inicial de los parámetros basada en las características de la cuenca del Valiñas. Posteriormente, empleando la opción de estimación automática de parámetros, se procedió en dos fases. Primeramente se calibraron los parámetros del modelo utilizando sólo los datos de caudales medidos en la estación de aforos. Los parámetros que se calibraron

incluyen: la capacidad de campo (su valor final resultó ser de 0.307), el espesor de suelo (1.4 m), la conductividad hidráulica vertical ($1.9 \cdot 10^{-6}$ m/s) y los coeficientes del método de Penman-Grindley para el cálculo de la ETR. En todos los casos se utilizó el método de Penman-FAO para el cálculo de la ETP. Posteriormente, la calibración se realizó utilizando conjuntamente los datos de caudales y niveles medidos en un pozo somero. El ajuste finalmente obtenido

es excelente, tanto para niveles freáticos (Fig 5) como de caudales (Fig. 6). Esto demuestra que el modelo presenta un comportamiento adecuado.

Como puede apreciarse en la Fig. 3, los resultados medios del balance indican que de los 1124 mm/año de precipitación media anual, existe una interceptación de 172 mm/año y una ETR de 368 mm/año. La escorrentía subsuperficial o hipodérmica es la componente mayoritaria de la escorrentía (464 mm/año), siendo casi nula la escorrentía superficial directa. La recarga al acuífero resulta ser del orden de 102 mm/año.

Además del balance hidrológico se realizó un detallado análisis de sensibilidad. La Figura 7 muestra la sensibilidad de las componentes del balance a variaciones en el valor del número de curva de la cuenca. Sólo a partir de valores del número de curva superiores a 50, comienzan a descender los valores del caudal subterráneo y del flujo hipodérmico. Aunque el valor adoptado del número de curva (46) podría parecer demasiado bajo para las condiciones de la cuenca, se aprecia en esta figura que la recarga al acuífero tomaría un valor medio aproximado de 50 mm/año para un número de curva de 90. Esta disminución de la recarga no sería coherente con el hidrograma de niveles y el coeficiente de almacenamiento del acuífero (del orden de 0.13). Además, con un número de curva mayor de 60 se obtienen unos caudales punta mucho mayores que los valores medidos. Análogamente, para números de curva superiores a 50 el error en el ajuste de niveles crece rápidamente.

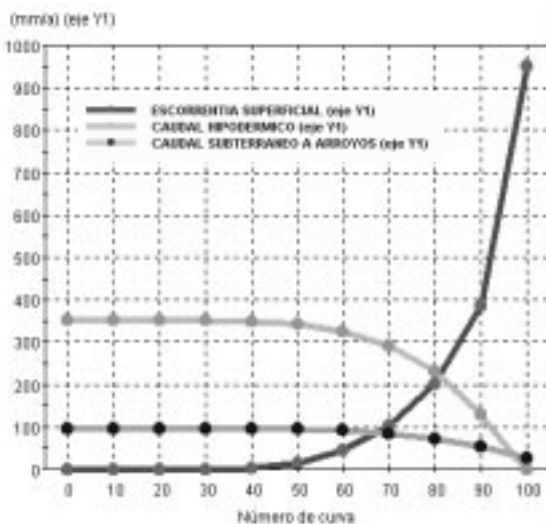


Fig. 7. Sensibilidad de las componentes del balance al número de curva para la cuenca del Valiñas (La Coruña)

El análisis de sensibilidad también indica que al aumentar la reserva útil del suelo disminuyen todos los flujos subterráneos (hipodérmico, recarga y descarga del acuífero). La escorrentía superficial resulta ser insensible a este parámetro ya que en el método del número de curva, la escorrentía superficial sólo depende del número de curva y

de los datos de precipitación.

4.- Conclusiones.

Se ha presentado un código interactivo para la realización de balances hidrológicos diarios en el suelo edáfico, la zona no saturada y el acuífero, VISUAL BALAN V 1.0. Además de ilustrar su carácter interactivo, se han mostrado algunas de sus principales características. Las opciones de realización de análisis de sensibilidad a los parámetros del modelo así como la de estimación automática de los parámetros se han ilustrado mediante la aplicación a una pequeña cuenca húmeda del norte de España. Los resultados obtenidos con el ajuste automático son excelentes ya que reproducen los valores medidos de aforos y niveles freáticos.

Agradecimientos. Los trabajos presentados han sido desarrollados en el marco de Proyectos de Investigación financiados por la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (Proyectos AGR89-146-C02-01; AMB95-0997-C02-01 y HID98-282) y de la Consellería de Educación de la Xunta de Galicia (Proyecto XUGA1180A94), así como por diversos proyectos de I+D financiados por la Empresa Nacional de Residuos Radiactivos (ENRESA), a través de un Convenio con la Fundación de la Ingeniería Civil de Galicia y la Universidad de La Coruña (Proyecto Interactivo, código: 703336). El código VISUAL BALAN es la extensión de versiones anteriores del programa BALAN, en cuya elaboración y perfeccionamiento participaron entre otros: F. Ortuño, C. Tore y E. Custodio. También queremos agradecer la colaboración desinteresada de todos los usuarios del código que ha contribuido a su continua mejora.

Referencias.

- Ares, J. 1999. Desarrollo y aplicación de modelos interactivos de balance hidrológico. *Tesina*. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad de A Coruña. 314 pp.
- Custodio, E., M.R. Llamas y J. Samper, (ed.). 1997. *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica*. Seminario de la AIH-GE. Las Palmas de Gran Canaria, enero de 1997. Ed. Instituto Tecnológico Geominero de España. Madrid. 455 pp.
- Press, W.H., S.A. Teukolsky, W.T. Vetterling y B.P. Flanery. 1989. *Numerical Recipes*, Cambridge University Press.
- Samper, J. 1998. Evaluación de la recarga por la lluvia mediante balances de agua: Utilización, Calibración e Incertidumbres. *Boletín Geológico y Minero*, 109 (4): 31-54.
- Samper, J. y M. A. García Vera. 1992. *Manual de usuario del programa BALAN_8*. Dpto. Ingeniería del terreno. E.T.S. de Ingenieros de Caminos. UPC. Barcelona.
- Samper, J., Soriano, G. y J. Molinero. 1997. Las aguas subterráneas en Galicia: Resultados en la cuenca piloto del río Valiñas. *Hydrogeology of Hard Rocks*. Ed. A.I.H.: G.E. 149-157
- Samper, J y M. A. García Vera. 1997. Evaluación de la recarga a partir de modelos numéricos de flujo en acuíferos. En: *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la Planificación Hidrológica*. Las Palmas de Gran Canaria. AIH-GE. 153-180.
- Samper J., Huguet, L., García-Vera, M. A., Ares, J. 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. *Informe Técnico para ENRESA*. Universidad de A Coruña. 124 pp.