

MODELO HIDROLÓGICO SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEO DESARROLLADO PARA LA SIMULACIÓN DE SISTEMAS DE LLANURA.

2. ESTRATEGIAS PARA LA CALIBRACIÓN.

E. D. Zimmermann

CONICET, Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales (CURIHAM). Fac. Cs Ex, Ing. y Agrim.
Universidad Nacional de Rosario. Riobamba 245 bis. (2000) Rosario. Argentina. E-mail: erikz@fceia.unr.edu.ar

Resumen. El modelo hidrológico SHALL3 fue concebido con parámetros de base física, no obstante, aquellos que presentaron incertidumbres o heterogeneidad en terreno fueron calibrados. El modelo fue puesto en operación en el sistema del arroyo Ludueña (Santa Fe, Argentina) disponiéndose de pluviografía y pluviometría en 5 estaciones, evaporación en tanque "A", limnigramas y aforos en dos secciones de control y freatimetría en dos pozos de observación. Como parámetros de calibración se tomaron (a) dos coeficientes de ajuste zonal para las conductividades hidráulicas verticales, (b) la succión crítica y la conectividad de poros y (c) dos coeficientes globales que ajustan las conductividades hidráulicas horizontales y el coeficiente de almacenamiento. El ajuste estuvo fuertemente influenciado por los parámetros de la ZNS. La interrelación entre los procesos hidrológicos simulados dificultó la selección de una función objetivo (FO) única, que al ser optimizada permitiese una estimación correcta de los parámetros. Se adoptó una FO combinada a minimizar, definida en función de coeficientes de correlación y errores cuadráticos en los escurrimientos, niveles freáticos y percolaciones. Se aplicó el algoritmo del gradiente conjugado con restricciones para la búsqueda de los óptimos. Los resultados alcanzados son satisfactorios y permiten utilizar el modelo en posteriores simulaciones de explotación.

Palabras claves: calibración, hidrología, llanuras, modelos matemáticos.

SURFACE AND SUBSURFACE HYDROLOGICAL MODEL DEVELOPED FOR SIMULATION OF FLATLAND SYSTEM. 2. STRATEGY OF CALIBRATION.

Abstract. The hydrological model SHALL3 was conceived with physically-based parameters, nevertheless, those that presented uncertainties or heterogeneities were fitted. The model was applied in the Ludueña's basin (Santa Fe, Argentina). Data of precipitation, evaporation, flows, limnigraphs and water-table are available. As calibration parameters was taken (a) two coefficients for the vertical hydraulic conductivity adjustments, (b) the critical suction and the pores connectivity and (c) two global coefficients that adjust the horizontal hydraulic conductivities and

the storage coefficient. Calibration was strongly influenced by the parameters of the vadose zone (ZNS). The interrelation between simulated processes make difficult the selection of a unique objective function (FO) in order to select an optimum group of parameters. A FO was adopted, defined in function of correlation coefficients and quadratic errors on the runoff, phreatic levels and groundwater recharges. The gradient algorithm was applied with restrictions for the search of the optimum. The reached results are satisfactory and they allow using the model in later simulations.

Palabras claves: calibration, hydrology, flatlands, mathematical models.

INTRODUCCIÓN

Se ha desarrollado un modelo matemático de simulación hidrológica cuasi-3D, denominado SHALL3, apto para representar áreas de llanura, para realizar predicciones de cambios en procesos hidrológicos provocados por acciones antrópicas a escala de cuenca y en el largo plazo. El modelo contempla las interacciones entre los procesos de superficie, en la zona no saturada (ZNS) y en la zona saturada (Zimmermann y Riccardi 2002). En cada celda ó unidad de discretización espacial puede cuantificar dinámicamente variables de estado, tales como almacenamientos por intercepción, superficial, en el perfil del suelo y subterráneo, así como flujos de humedad y vapor, tales como los envueltos en los procesos de evapotranspiración, ascenso capilar, escurrimiento superficial, mantiforme y encauzado, a superficie libre y a través de constricciones, infiltración, percolación profunda y escurrimiento subterráneo. Cada una de estas variables puede conocerse con una adecuada resolución espacial y temporal.

El modelo fue puesto en operación en el sistema hidrológico del arroyo Ludueña, y posteriormente fue calibrado utilizando información freaticométrica, pluviográfica y limnigráfica (período 1982-84). Los parámetros considerados fueron las conductividades hidráulicas verticales de las celdas y conductividades hidráulicas horizontales en las vinculaciones subterráneas. Si bien los resultados alcanzados fueron satisfactorios, se detectaron algunas deficiencias en la información disponible, atribuidas principalmente a la baja densidad de estaciones pluviográficas y freaticométricas, dando lugar a incertidumbres en la distribución espacial de la lluvia y de los niveles freáticos regionales.

No obstante los resultados alcanzados y atendiendo a las deficiencias en la información utilizada para la calibración del modelo, se propuso realizar una nueva calibración del SHALL3, la cual es presentada en esta segunda parte del trabajo, considerando nueva información relevada durante el período 1994-1995 en el sistema de estudio e incorporando como parámetros los que

regulan el funcionamiento de la ZNS. La calidad y variedad de la información disponible en este período reviste características inéditas.

PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

Se contó con registros pluviográficos digitalizados de Rosario Aero, Ibarlucea y Pérez, registros pluviométricos en Coronel Arnold y Zavalla, registros diarios de evaporación de tanque “A” y registros freaticométricos diarios en Zavalla, registros freaticográficos horarios en Pérez, registros limnigráficos horarios digitalizados en el Golf Club y Av. De Circunvalación (Figura 1). No existen registros históricos de tres pluviógrafos y dos limnógrafos operando simultáneamente, por ello el grado de detalle de esta información es inédito. El nivel de discretización espacial de la lluvia medida representó un avance importante en la reducción de incertidumbres provocadas por el desconocimiento de su distribución espacial.

Figura 1. Ubicación de las estaciones de medición.

El sistema hidrológico del arroyo Ludueña, de 700 km² de extensión, fue subdividido en un conjunto de celdas de características ó parámetros homogéneos. Para el flujo subterráneo, se realizó una discretización espacial equivalente con topologías de celdas en superficie, implementadas en anteriores simulaciones (Zimmermann y Riccardi 2002). Así, la estructuración del modelo permitió una simulación *cuasi-tridimensional* del flujo, con celdas de superficie vinculadas con sus pares subterráneas mediante esquemas de movimiento de flujo vertical en 70 capas de celdas intermedias, totalizando cerca de 3.700 elementos de discretización (Fig. 2).

Figura 2. Esquematización del sistema en celdas.

Información de entrada

Partiendo de la información pluviográfica digitalizada (Rosario Aero, Pérez e Ibarlucea) se construyeron los hietogramas registrados en los dos años de extensión del período de calibración, con paso horario (Zimmermann *et al* 2001).

La información pluviométrica (Cnel. Arnold y Zavalla) fue utilizada para construir hietogramas sintéticos. Se ajustaron regresiones lineales, con una componente aleatoria de ruido blanco, entre láminas de lluvia y duración de tormenta a partir de la información pluviográfica disponible. Luego, se generaron aleatoriamente duraciones de precipitación en función de las láminas pluviométricas registradas, aplicando la ecuación de regresión ajustada. Se adoptaron

hietogramas de tipo triangular, dado que esta distribución presenta la mayor frecuencia en la región (Zimmermann 1998).

Con las cinco series de tormentas de paso horario correspondientes a las estaciones de registro, se estimaron las láminas precipitadas horarias en cada una de las celdas de discretización con una extensión temporal de dos años (período de calibración) aplicando una metodología de interpolación basada en la estructura de correlación espacial de registros pluviométricos (Zimmermann y Silber, 2002).

Se construyeron series diarias de evapotranspiración potencial con los registros de evaporación de tanque tipo “A” de la estación agroexperimental de Zavalla, afectándolos por un coeficiente de tanque de 0,75.

Parámetros de superficie

Los parámetros de superficie como almacenamientos por intercepción se estimaron en base a tipos de cultivos presentes, recurriendo a valores citados bibliográficamente (Chow et al 1994). Los porcentajes de cobertura del suelo, utilizados por el modelo de intercepción, se estimaron considerando como variables los factores de cultivo - definidos como la relación entre el área cultivable y el área total de cada celda -, los tipos de cultivos y su grado de crecimiento según día del año. Los porcentajes de ocupación de cada cultivo fueron estimados basándose en censos de producción agrícola realizados por la Facultad de Ciencias Agrarias (UNR) y las curvas de desarrollo del cultivo fueron propuestas basándose en el ciclo vegetativo de cada cultivo. Las capacidades de almacenamiento superficial se estimaron por medición de las áreas de almacenamiento detectadas mediante aerofotografías y cartografías del Instituto Geográfico Militar, en escala 1:50000.

Análisis de la zona saturada

La zona saturada (ZS) fue caracterizada por la conductividad hidráulica horizontal y el coeficiente de almacenamiento del medio permeable. Tales parámetros fueron calibrados previamente con la operación del modelo GW8 (Zimmermann 1994) y fueron tomados como valores de referencia. Los parámetros que específicamente se adoptaron para la calibración consistieron en dos coeficientes globales, ckh y cS , que afectaron las conductividades hidráulicas horizontales de cada vinculación subterránea entre celdas y los coeficientes de almacenamiento de cada celda, previamente definidos.

Análisis de la zona no saturada

La zona vadosa fue analizada con detenimiento dado que es la que conecta la hidrología de superficie con la subterránea, dando lugar a importantes procesos de intercambio de flujo. Cada celda del modelo fue asociada con un valor de conductividad hidráulica vertical K_v , representativa, la cual fue estimada en función de las series de suelos presentes en la cuenca, las asociaciones de series, sus texturas y pH, humedades de saturación y potenciales de succión del frente húmedo mediante una metodología de ponderación basada en el modelo de Green y Ampt (Zimmermann 2000a). El valor ponderado representa la conductividad hidráulica equivalente que provoca un volumen infiltrado igual a la suma de los producidos en cada subdivisión homogénea. Para la estimación de conductividades hidráulicas y potenciales de succión en función de la composición textural se utilizaron los ábacos de Rauls y Brakensiek (citados por Tucci, 1989).

Los K_v de cada celda fueron afectados por un coeficiente corrector global a los fines de la calibración, es decir que la distribución espacial de las conductividades hidráulicas adoptada a priori no fue modificada. A diferencia con la calibración realizada para el período 1982-84, la existencia de información limnigráfica en las estaciones Golf Club y Circunvalación permitió el agrupamiento de las celdas representativas del área Ludueña (con cierre en la estación Golf Club) con un coeficiente correctivo $ckvL$ en forma separada de las celdas representativas del área del canal Ibarlucea (Figura 2), las cuales fueron afectadas por un coeficiente correctivo distinto, $ckvI$.

Para caracterizar el medio no saturado se construyeron las curvas de conductividad vs. humedad volumétrica $kv(\theta)$, potencial mátrico vs. humedad $\psi(\theta)$ y difusividad vs. humedad $D(\theta)$ utilizándose las expresiones de Brooks-Corey:

$$|\psi(\theta)| = \frac{P_b}{S_e^b} \quad (1)$$

$$kv(\theta) = K_v S_e^{ek} \quad (2)$$

$$S_e(\theta) = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

siendo S_e la saturación efectiva del suelo, θ_r es la humedad residual, θ_s es la humedad de saturación. Para obtener valores iniciales de los parámetros que a a fueron sujetos a calibración, se ajustaron las relaciones anteriores sobre muestras de suelos de INTA Oliveros (pcia. de Santa Fe). Las ecuaciones ajustadas representan características medias de muestras extraídas en horizontes A y B bajo diferentes condiciones de uso del suelo. El rango ajustado para los parámetros P_b y b en (1) se describe en la Tabla 1. Para la estimación del exponente ek en (2) fueron consultadas diferentes

bibliografías (Chow et al 1994, Candela y Varela 1993) y bases de datos como la base UNSODA versión 1.0 (Leij et al 1996), ante la falta de información de campo. De la información recogida se obtuvo una media para el exponente ek de aproximadamente 3, que resultó el valor finalmente adoptado.

Por otro lado, dado que la ZNS está compuesta por un paquete de estratos de parámetros hidráulicos y espesores diferentes (horizontes). Los suelos en la zona de estudio presentan perfiles típicos con espesores de horizonte A que oscilan entre 20 y 40 cm, con contenidos de arcilla entre 17% y 25%. Los espesores de horizontes B típicos oscilan entre 110 y 145 cm, presentado contenidos de arcilla entre 50% y 56%. Un aspecto analizado fue el comportamiento del conjunto heterogéneo de la ZNS. Se desarrolló un modelo numérico distribuido en la vertical, donde se consideraron diferentes propiedades hidráulicas, asociadas a diferentes parámetros de las ecuaciones (1) a (3). Como resultado preliminar de las simulaciones, se obtuvo que el comportamiento del conjunto heterogéneo está supeditado al comportamiento del material de mayor espesor (Zimmermann E, Informe anual CONICET, comunicación personal, 2001). Consecuentemente, en la implementación del modelo se consideraron las celdas de la zona no saturada con iguales parámetros hidráulicos en profundidad, en correspondencia con las propiedades de los horizontes B. Debe aclararse que el modelo permite diferenciarlos y es posible contemplar esta situación disponiendo de información suficiente.

Tabla 1. Valores iniciales y rangos de variación para los parámetros adoptados

Parámetro	Valor Inicial	Valor mínimo	Valor máximo	Referencia
KvL (m/d)	0.0560	0.0380	0.0940	Calibración previa modelo SHALL3 (Zimmermann 2000b)
KvI (m/d)	0.0260	0.0066	0.0930	Calibración previa modelo SHALL3 (Zimmermann 2000b)
Pb	3.76	2.97	5.83	Valor mínimo corresponde a horizonte B con pasturas, valor máximo a horizonte A con cobertura de cultivos. Valor inicial corresponde a curva media. Ensayos de INTA Oliveros.
B	1.82	0.98	2.26	Valor mínimo corresponde a horizonte A con cobertura de cultivos, valor máximo a horizonte B con pasturas. Valor inicial corresponde a curva media. Ensayos de INTA Oliveros.
Kh (m/d)	6.25	2.5	11.0	Calibración de parámetros del acuífero mediante el modelo GW8 (Zimmermann 1994).
S	0.08	0.03	0.15	Calibración de parámetros del acuífero mediante el modelo GW8 (Zimmermann 1994).

CALIBRACIÓN DEL SHALL3

El conjunto de parámetros que fueron sujetos a calibración resultaron: los dos coeficientes de ajuste zonal para las conductividades hidráulicas verticales $ckvL$ y $ckvI$, la succión crítica Pb y el exponente de las curvas de retención del suelo b (también citado como conectividad de poros) y los

dos coeficientes globales que ajustan las conductividades hidráulicas horizontales ckh y los coeficientes de almacenamiento cS .

Cada corrida del modelo implicó la gestión de unos 2.000.000 de datos de variables dinámicas para las casi 3.700 celdas empleadas para la discretización espacial, resultando en una hora de máquina en una PC 500 MHz . En su conjunto, las tareas de calibración consumieron unas 450 hs. de máquina.

Algoritmo empleado para el ajuste.

El problema a resolver involucra a funciones objetivos complejas de varias variables junto a parámetros con restricciones impuestas. Se trata de un problema de optimización no lineal y debe resolverse por la vía numérica (Boizán Jústiz, 1988). Entre los algoritmos de búsqueda de óptimos existentes se consideró adecuado al método del gradiente, contando esta selección con la ventaja adicional de haber diseñado con anterioridad un programa computacional aplicable a este caso. El programa de cálculo está desarrollado para la búsqueda de los óptimos de una Función Objetivo (FO) multidimensional con restricciones. Básicamente el algoritmo parte de un punto base posible $\mathbf{x}^0(x_1, x_2, \dots, x_n)$ sobre el cual se evalúa la FO $y(\mathbf{x}^0)$ y el gradiente de la FO ∇y . Para construir el gradiente, se estiman las derivadas parciales mediante cocientes incrementales del tipo:

$$\frac{\partial y}{\partial x_i} \approx \frac{y(x_1, x_2, \dots, x_i + \Delta x_i, \dots, x_n) - y(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)}{\Delta x_i} \quad (4)$$

para $i=1, 2, \dots, n$ donde Δx_i es un valor pequeño respecto al valor de x_i (en el proceso de estimación del gradiente $\Delta x_i/x_i$ fue fijado arbitrariamente en un valor de 0.01). El gradiente proporciona un vector que determina la dirección del óptimo de la FO. Se selecciona un nuevo punto en el espacio multidimensional cuya FO $y(\mathbf{x}^1)$ se acerca al óptimo buscado. En forma genérica puede expresarse que:

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k \pm \nabla y \Delta h \quad (5)$$

El signo del segundo miembro se adopta positivo si la búsqueda es hacia un máximo y viceversa. El paso de búsqueda Δh , que representa la distancia al punto $\mathbf{x}^k$, debe cumplir con las restricciones impuestas a los parámetros. En el proceso de calibración llevado a cabo, una vez definida la

dirección de avance con el cálculo del gradiente, el programa de cálculo adopta un paso de búsqueda arbitrariamente grande. Posteriormente, es reducido iterativamente hasta que verifique cada una de las restricciones impuestas a los parámetros, seleccionando de esta manera un Δh máximo acotado con los rangos máximos preestablecidos para los parámetros (Tabla 1). El proceso de búsqueda de los mínimos en las FO finaliza cuando en dos iteraciones sucesivas, la diferencia entre las FO calculadas es inferior a un tolerancia preestablecida (la cual fue adoptada en 0,0001) y/o es superada una cantidad máxima de iteraciones fijada de antemano.

Análisis de sensibilidad

Se realizaron corridas previas con el SHALL3 bajo la configuración adoptada para la calibración en el período 1994-95 con el propósito de determinar la sensibilidad de los diferentes procesos que simula. Las funciones objetivos (FO) consideradas en esta primera fase de análisis consistieron en errores cuadráticos asociados a las láminas de precipitación neta observadas y calculadas para un conjunto de siete tormentas de gran magnitud y en las dos secciones de control de las cuales hay registros limnigráficos:

$$EQ_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^7 (QCC_i - QOC_i)^2} \quad (6)$$

$$EQ_2 = \sqrt{\sum_{i=1}^7 (QCG_i - QOG_i)^2} \quad (7)$$

donde QCC_i y QCG_i son las láminas netas calculadas para la tormenta i en las estaciones de control de Av. Circunvalación y Golf Club, respectivamente, en tanto que QOC_i y QOG_i representan las láminas observadas. Se adoptaron las tormentas de gran magnitud extraídas del período de calibración dado que los registros limnigráficos presentan discontinuidades, por lo que se dificultó la tarea de comparar los escurrimientos acumulados en el período. Como resultado del análisis de sensibilidad realizado se determinó que las tasas y volúmenes de infiltración y escurrimiento resultaron muy sensibles a los coeficientes $ckvI$ y $ckvL$ para las áreas del canal Ibarlucea y el arroyo Ludueña, respectivamente. No resultaron sensibles ni a ckh ni cS . La percolación o recarga freática resultó sensible a los parámetros de la ZNS, principalmente. La evapotranspiración resultó poco sensible al conjunto de los parámetros.

A partir de este análisis realizado, se propuso un ajuste preliminar selectivo de parámetros dado que cada proceso es sensible a un conjunto parcial de parámetros. En principio se planteó que el

escurrimiento superficial dependería principalmente de las conductividades hidráulicas verticales, la succión crítica y la conectividad de poros. Ajustados estos parámetros, en una fase posterior, se ajustarán los niveles freáticos que dependerían de las conductividades hidráulicas horizontales y los coeficientes de almacenamientos. Es decir que, *a priori*, podrían calibrarse por separado los parámetros que gobiernan la respuesta hidrológica superficial y los que caracterizan la respuesta hidrológica subterránea.

Calibración de parámetros de la ZNS.

En una primera fase de calibración, denominada *fase 0*, se ajustaron conjuntamente los coeficientes $ckvL$ y $ckvI$ mientras que los parámetros restantes permanecieron arbitrariamente constantes. Esto se realizó con la finalidad de obtener un orden de magnitud para los coeficientes que regulan la conductividad hidráulica vertical que sea válida para las siguientes etapas de ajuste. La FOs consideradas fueron EQ_1 y EQ_2 . Los parámetros ajustados y los errores obtenidos se presentan en la Tabla 2.

La *fase 1* consistió en el ajuste de los parámetros de la ZNS (Pb , b y $ckvL$) del área Ludueña tomando como FO la función EQ_2 . Respecto a la fase anterior, se observó un ligero decremento de los errores EQ_2 con un valor del parámetro Pb semejante al obtenido para el horizonte B con cobertura de pasturas (Tabla 1) y una conductividad hidráulica vertical prácticamente igual a la obtenida en la fase anterior.

La *fase 2* consistió en el ajuste de los mismos parámetros para el área del canal Ibarlucea (Pb , b y $ckvI$) tomando como FO los errores EQ_1 . Puede observarse en Tabla 2 que los parámetros ajustados no han variado significativamente en comparación con la fase anterior. Consecuentemente, puede afirmarse que ajustando los parámetros de la ZNS con funciones de error deducidas en la estimación de los escurrimientos se llegan a resultados que convergerían a una solución única.

Calibración de parámetros de la ZS.

En la *fase 3* de calibración se prestó atención a los parámetros de la zona saturada. La FO seleccionada para el ajuste fue la siguiente:

$$EZF = \left[\sqrt{\frac{1}{172} \sum_{i=1}^{172} (ZFZav_i - ZF524_i)^2} + \sqrt{\frac{1}{172} \sum_{i=1}^{172} (ZFPer_i - ZF533_i)^2} \right] * 0.5 \quad (8)$$

donde $ZFZav_i$ y $ZFPer_i$ son los niveles freáticos observados en los freatómetros de Zavalla y Pérez, respectivamente, mientras que $ZF524_i$ y $ZF533_i$ son los niveles simulados en las celdas 524 y 533 ubicadas en las cercanías de las estaciones de registro (Fig. 2). El subíndice i representa el evento lluvioso para el cual se registraron los niveles simulados. Esta FO implica un promedio de los errores cuadráticos medios para ambas estaciones.

En Tabla 2 puede observarse que, para los parámetros iniciales de la ZS correspondientes a la *fase 2*, la FO resultó en un valor de 3,34 m, en tanto que con el ajuste realizado en la *fase 3* se ha reducido a 2,06 m. No obstante, el valor en sí es significativo y el mismo se ha alcanzado con un juego de parámetros bastante diferentes de los ajustados con otros modelos que fueron aplicados en el sistema de estudio (Zimmermann 1994). Se verificó que para reducir EZF fue necesario aumentar aún más la conductividad hidráulica horizontal y el coeficiente de almacenamiento alcanzando valores que carecerían de sentido físico.

La comparación de los niveles freáticos simulados y observados a lo largo del período de calibración puso en evidencia tendencias evolutivas totalmente diferenciadas. Se adoptó un juego de parámetros Pb y b , que si bien no provocaban los mínimos para las FOs EQ_1 y EQ_2 durante la *fase 2* sí generaban errores EZF bajos (Tabla 2, fase 3B). Por otra parte se analizaron los coeficientes de correlación obtenidos por regresión lineal simple entre los niveles observados y simulados en ambos freatómetros (r_1 para Zavalla y r_2 para Pérez). Esto permitió contar con indicadores de tendencias en la evolución temporal de los niveles freáticos. Con el fin de proponer una FO que contemplara ambos freatómetros se propuso el producto entre r_1 y r_2 el cual debió ser maximizado. Los ajustes realizados con esta nueva FO mejoraron notoriamente la evolución entre niveles freáticos simulados y observados en comparación con los resultados alcanzados previamente. Los valores del coeficiente de almacenamiento y de la conductividad hidráulica alcanzados se acercaron notablemente a los calibrados precedentemente (Tabla 2, fase 3B). No obstante, los niveles simulados aún no reflejaron las tendencias observadas en forma satisfactoria. Pudo observarse una muy baja sensibilidad de los errores EZF , EQ_1 y EQ_2 frente a los cambios de ckh y cS . Los parámetros óptimos para cada FO resultaron diferentes también. Los desfases entre los niveles freáticos observados y simulados parecían obedecer en mayor medida a los parámetros de la ZNS (Pb y b), levemente modificados respecto a la fase 3A, que a los parámetros propios del acuífero.

Esto evidencia que hay una sensibilidad marcada de los niveles freáticos frente a las propiedades de la ZNS. En esta dirección, la conexión ZNS-ZS está sustentada por la recarga del acuífero.

Seguidamente, se estimaron las recargas del sistema mediante las variaciones de los niveles freáticos afectadas por la porosidad efectiva. Al compararlas con los valores simulados por el modelo se comprobó una sobreestimación de las recargas por parte de este último. Evidentemente no es factible realizar una calibración de los parámetros que regulan el comportamiento de la freática sin contemplar un buen ajuste en los volúmenes de aporte a las celdas subterráneas. Por tal razón se incluyó como FO adicional el error absoluto de estimación en la recarga acumulada durante el período de calibración. La FO se resume como la diferencia entre el promedio de la recarga estimada y acumulada en ambos freatómetros y la recarga B_i acumulada simulada por el modelo:

$$EB = \left[\sum_{i=2}^{172} \frac{(ZFZav_i - ZFZav_{i-1})}{2} + \frac{(ZFPer_i - ZFPer_{i-1})}{2} \right] * \eta_e - \sum_{i=1}^{172} B_i \quad (9)$$

donde la porosidad efectiva η_e fue estimada de acuerdo al valor calibrado previamente (Zimmermann 1994). La recarga B_i fue estimada mediante la adición de todos los flujos de intercambio calculados para las celdas ubicadas inmediatamente por encima y por debajo del nivel freático. Se ajustaron los parámetros Pb y b de manera que se minimicen los errores EB , dando lugar a la fase 4 de la calibración (Tabla 2).

Las estimaciones de las recargas resultaron aceptables (Figura 3). Los valores de Pb y b óptimos fueron muy cercanos para las diferentes FOs. Es notable la sensibilidad que presentaron los intercambios de flujos entre ZNS y ZS a los parámetros de la curva de retención

Calibración global.

La desconexión propuesta entre la hidrología de superficie y la subterránea para simplificar las tareas de la calibración no fue factible. Evidentemente, el sistema real funciona globalmente y desacoplar subsistemas que operan en forma conjunta resultó ser una propuesta reduccionista e inviable.

Atendiendo esto, se propuso una calibración general de los parámetros que regulan el funcionamiento del sector Ludueña, ya que los registros freatimétricos corresponden a ese sector (fase 5). Se contemplaron a los coeficientes $ckvL$, Pb , b , ckh y cS como parámetros sujetos al ajuste mientras que se propuso como FO a minimizar una combinación de las FO previamente definidas,

de manera tal que contemple una buena representación de variables de superficie (escurrimientos) y subterráneas (niveles freáticos), a saber:

$$FO = \log[EQ_1.EQ_2.EZF.(1 - r_1).(1 - r_2).EB] \quad (10)$$

Minimizar el logaritmo del producto de FOs implica minimizar el producto de FOs, lo cual representa el mismo objetivo. Por otro lado el hecho de haber aplicado el logaritmo al producto hizo que los valores de la FO sean manejables desde un punto de vista numérico.

Los óptimos encontrados aplicando el algoritmo de ajuste definido previamente se muestran en la Tabla 2 (fase 5). Allí también se detallan los óptimos encontrados para cada FO por separado. Se observa que el conjunto de parámetros que minimizan cada FO son diferentes entre sí, lo cual pone de manifiesto que no es posible dar con un juego de parámetros que optimice la “respuesta general” del sistema. El juego óptimo será en función de la FO propuesta.

La FO descrita por (10), ofrece una alternativa intermedia que permite contemplar las variables más relevantes en conjunto, atendiendo el buen pronóstico de los escurrimientos en superficie, de las recargas subterráneas y de los niveles freáticos y sus tendencias evolutivas en el tiempo. En esta dirección, la FO propuesta constituye un aporte metodológico para las tareas de ajuste de este tipo de modelos de alto nivel de detalle.

Tabla 2. Valores de los parámetros y funciones objetivos obtenidos en cada fase de calibración.

Fase	Propósitos	Parámetros ajustados						Funciones Objetivos					
		KvL (m/d)	KvI (m/d)	Pb (m)	b adim	Kh (m/d)	S adim	EQ_1 (mm)	EQ_2 (mm)	EZF (m)	r_1*r_2 adim	EB (mm)	FO adim
0A	Ajustar volúmenes de escurrimiento simulados en estación Circunvalación. Estimar valores iniciales de los parámetros.	0.038	0.033	3.76	1.82	6.25	0.04	49.92					
0B	Ajustar volúmenes de escurrimiento simulados en estación Golf Club. Estimar valor inicial del parámetro.	0.055	0.033	3.76	1.82	6.25	0.04		33.45				
1	Ajustar volúmenes de escurrimiento simulados en subcuenca Ludueña. Estimar valores de los parámetros que gobiernan el fenómeno.	0.054	0.033	2.93	1.36	6.25	0.04		30.38				
2	Ajustar volúmenes de escurrimiento simulados en la cuenca total. Estimar valores de los parámetros que gobiernan el fenómeno.	0.054	0.043	2.94	1.32	6.25	0.04	48.77		3.34			
3A	Ajustar niveles freáticos simulados en las estaciones Zavalla y Pérez.	0.054	0.043	2.94	1.32	9.85	0.14	40.85	35.91	2.06			
3B	Ajustar tendencias de los niveles freáticos simulados en las estaciones Zavalla y Pérez.	0.054	0.043	2.92	1.59	6.30	0.04	46.00	13.66	0.80	0.69		
4	Ajustar valores de la recarga freática simulada para mejorar ajuste de niveles freáticos.	0.054	0.043	2.67	1.80	6.25	0.04	48.12	11.93	1.01	0.66	3	
5	Ajuste general de parámetros contemplando errores en escurrimientos, recargas y niveles freáticos (Subcuenca Ludueña). Este ajuste también minimiza los EB y maximiza el producto de los coeficientes de correlación r_1*r_2	0.054	0.043	2.67	1.80	5.00	0.04	48.12	11.93	0.86	0.71	0.01	-0.16
	Valores de los parámetros que minimizan el error EQ_1	0.054	0.043	2.28	1.51	6.25	0.04	48.45	34.78	3.63	-0.05	2,402	7.23
	Valores de los parámetros que minimizan el error EQ_2	0.054	0.043	2.36	1.92	6.25	0.04	52.34	11.84	0.48	0.53	253	4.44
	Valores de los parámetros que minimizan el error EZF	0.054	0.043	2.66	1.74	5.30	0.05	52.50	12.98	0.44	0.48	-266	6.66
6	Ajuste final de la conductividad hidráulica vertical en subcuenca Ibarlucea.	0.054	0.007	2.67	1.80	5.00	0.04	43.32	12.49	0.86	0.71	-10	3.47

Referencias: $FO = \text{Log}[EQ_1 * EQ_2 * EZF * (1 - r_1) * (1 - r_2) * EB]$. Los valores en negrita corresponden a los parámetros ajustados y las FOs considerados en forma simultánea para cada fase de la calibración.

Figura 3. Percolaciones acumuladas estimadas y calculadas por el SHALL3.

Figura 4. Evolución de niveles freáticos observados y calculados.

Los niveles freáticos estimados a partir de esta fase de la calibración se aprecian en la Figura 4. Teniendo presente que un conjunto de propiedades se ha calibrado en forma global (curvas de retención del suelo, conductividades hidráulicas horizontales y coeficientes de almacenamiento) se ha considerado que el ajuste es satisfactorio.

Finalmente, se ajustaron las conductividades hidráulicas verticales del área Ibarlucea, utilizando el coeficiente corrector $ckvI$ conjuntamente con la FO EQ_I (Tabla 2, fase 6). Los volúmenes de escurrimiento superficial calculados y observados en las secciones de control, Golf Club y Av. de Circunvalación, para las tormentas seleccionadas a priori pueden observarse en las Figuras 5 y 6, respectivamente.

Figura 5. Ajuste de volúmenes netos en Golf Club

Figura 6. Ajuste de volúmenes netos en Circunvalación

CONCLUSIONES

Se ha descrito la estrategia empleada para la calibración de un modelo hidrológico superficial - subterráneo de alto nivel de detalle. En el trabajo se demuestra la alta sensibilidad que presentan los procesos subterráneos (observables en el sistema mediante los niveles freáticos) y los procesos hidrológicos superficiales (observables a través de volúmenes de escurrimiento) frente a los parámetros que caracterizan la ZNS: conductividad hidráulica vertical, succión crítica y conectividad de poros. Esto resalta el rol protagónico que ejerce la zona vadosa en la recarga freática y en la infiltración, que constituyen los procesos que interconectan la hidrología superficial y la subterránea. En el desarrollo de las diferentes etapas de la calibración, esto se puso de manifiesto en la imposibilidad de realizar ajustes parciales de los parámetros para reproducir aisladamente, en el sistema del Arroyo Ludueña, volúmenes de escurrimiento ó niveles freáticos. Se concluyó en la conveniencia de realizar una calibración global que incluya las conductividades hidráulicas verticales, succión crítica y conectividad de poros de la ZNS, y conductividades hidráulicas horizontales y coeficientes de almacenamiento de la ZS para garantizar una reproducción satisfactoria de escurrimientos y niveles freáticos observados en el sistema real. Los juegos de parámetros óptimos resultaron diferentes en correspondencia con las diferentes funciones objetivos parciales propuestas. En este sentido, la función objetivo propuesta representa un aporte metodológico a la temática, combinando un buen pronóstico de los escurrimientos en superficie, de las recargas subterráneas y de los niveles freáticos junto a sus tendencias evolutivas en el tiempo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Boizán Jústiz, M. 1988. *Optimización*. Edit. Pueblo y Educación. La Habana. Cuba. 294p.

Candela, L. y Varela, M. 1993. *La zona no saturada y la contaminación de las aguas subterráneas*. Ed. CIMNE. Barcelona. 322 pp.

Chow, V.T., Maidment, D. y Mays, L. 1994. *Hidrología aplicada*. Mc Graw-Hill Interamericana SA. Colombia. 584 pp.

Leij, F., Alves, W., Van Genuchten, M. y Williams, J. 1996. The UNSODA unsaturated soil hydraulic database: User's Manual. EPA. USA.

Tucci, C. 1989. *Hidrología Aplicada*. Colección ABRH de Recursos Hídricos. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. UFRGS. Porto Alegre. Brasil.

Zimmermann, E. 1994. Evolución temporal de niveles freáticos y de las zonas de interacción con la hidrología superficial en un área de llanura. *II Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea*. Sgo. de Chile, Chile. I: 253-264.

Zimmermann, E. 1998. Synthetic storm generation in a flatland region (Santa Fe, Argentina). *Journal of Environmental Hydrology*. 6 (2). International Association of Environmental Hydrology. www.hydroweb.com, e-mail: postmaster@hydroweb.org

Zimmermann, E. 1999. Assessment of hydrological changes associated to irrigation projects in a flatland area (Santa Fe, Argentina). *Journal of Environmental Hydrology*, 7 (1). International Association of Environmental Hydrology. www.hydroweb.com, e-mail: postmaster@hydroweb.org

Zimmermann, E. 2000a. Metodología para la estimación de la conductividad hidráulica equivalente en suelos no saturados heterogéneos. *Cuadernos del CURIHAM*. PHI-UNESCO. 6 (1), 1-12.

Zimmermann, E. 2000b. Aplicación y calibración del modelo SHALL3 en el sistema hidrológico del A° Ludueña, Santa Fe, Argentina. *XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Córdoba. Argentina. II: 713-722.

Zimmermann, E., Riccardi, G., Pieroni, H. y Arraigada, M. 2001. Curvas de abatimiento areal de tormentas. Región Pampa Ondulada (Santa Fe Argentina). *Cuadernos del CURIHAM*. PHI-UNESCO. 7 (1), 24-37.

Zimmermann, E. Y Silber, M. 2002. Algoritmo para la representación de campos de precipitación. *XIX Congreso Nacional del Agua*. Carlos Paz. Argentina. ISSN: 987-20378-1-7 (libro y CD-ROM).

Zimmermann, E. y Riccardi, G. 2002. Modelo hidrológico superficial y subterráneo desarrollado para la simulación de sistemas de llanura. *XXXII IAH & VI ALHSUD Congress 2002*. Mar del Plata. Argentina. En CD-ROM.

Green W, Ampt G. (1911) Studies on soil physics, part 1, the flow of air and water through solis. J. Agric. Sci. Vol 4 Nro. 1, 1-24.

INTA (1981) Mapas de Suelos. Cartas Roldán y Zavalla.

Richards L. (1931) Capillary conduction of liquids through porous mediums. Physics. Vol 1, 318-333