

CALIBRACIÓN DEL MODELO SHALL CON ELEVADO NIVEL DE DETALLE EN LA CUENCA DEL A° LUDUEÑA UTILIZANDO SIG

Jovita Méndez Zacarías y Erik Zimmermann

Facultad Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura - Universidad Nacional de Rosario. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Riobamba 245 bis. (2000) Rosario, Santa Fe, Argentina.

Mail de contacto: jovitamz@fceia.unr.edu.ar

RESUMEN

Se presenta la implementación y calibración del sistema de simulación hidrológica cuasi-3D denominado SHALL en la cuenca del Arroyo Ludueña (740 km²), ubicada en el sur santafesino. El modelo contempla las componentes subterráneas y superficiales de flujos de agua, junto con los flujos de intercambio verticales hacia el acuífero y la atmósfera.

La gestión de información necesaria se realiza mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), adoptando una discretización espacial mediante celdas regulares de 1000 m de lado, a las cuales se les asignó datos topográficos, de usos de suelo, edáficos, geológicos y red de drenaje, etc. Se contó con información pluviográfica y pluviométrica en 5 estaciones, una estación de evaporación de tanque "A", limnigramas y aforos en dos secciones de control y freaticimetría en dos pozos de observación.

Si bien el modelo presenta parámetros de base física, algunos fueron calibrados en forma global, planteando una función objetivo combinada a minimizar, definida en función de coeficientes de correlación y errores cuadráticos en los escurrimientos y niveles freáticos. Los resultados alcanzados mejoran ampliamente el ajuste obtenido para una implementación previa del modelo conformada con menor grado de detalle.

Palabras clave: Modelación hidrológica continua, calibración de parámetros, llanura santafesina.

ABSTRACT

In this paper we present the implementation and the calibration of a quasi-3D hydrological simulation system called SHALL. This model was applied in a 740 km² basin (Ludueña Creek) located at the South of Santa Fe province. The model includes groundwater and surface water flow components, together with vertical flows into the aquifer and the atmosphere.

Data managing is performed using Geographic Information Systems (GIS), taking into account a spatial discretization with 1000 m - side regular cells. Every cell is assigned with drainage network information and topographic, land use, soil type and geological data. Additionally, information of rain gauges in 5 stations, Class A evaporation pan on one station, and water levels in two control sections and water table information at two wells was utilized.

Despite the model parameters are physically based, some ones were calibrated globally, proposing a combined objective function to minimize, defined in terms of correlation coefficients and squared errors in runoff and groundwater levels. The results obtained greatly improve the fit obtained with a previous implementation of the model formed with lower detail.

Keywords: Continuous hydrologic modeling, calibration of parameters, Santa Fe flatlands.

1 INTRODUCCIÓN

En el marco del programa de investigación llevado a cabo en el Departamento de Hidráulica y el Centro Universitario de Investigaciones Hidroambientales (CURIHAM), ambos dependientes de la Facultad de Ciencias Exactas, Ingeniería y Agrimensura (FCEIA) – Universidad Nacional de Rosario (UNR), se ha desarrollado un modelo matemático de simulación hidrológica cuasi-3D denominado SHALL (Simulación Hidrológica de Áreas de Llanura).

El modelo SHALL contempla las interacciones entre los procesos de superficie, en la zona no saturada (ZNS) y en la zona saturada (Zimmermann y Riccardi, 2000). El mismo puede cuantificar dinámicamente, en cada unidad de discretización espacial, los procesos de almacenamiento por intercepción, superficial, en el perfil del suelo y subterráneo, así como los procesos de evapotranspiración, infiltración, percolación profunda y escurrimientos superficial y subterráneo.

El nivel alcanzado en el desarrollo de modelos necesita ser validado en el campo de la aplicación a sistemas hidrológicos de la región. La gestión de la información necesaria para abastecerlos involucra un esfuerzo de recopilación y generación de herramientas computacionales para automatizar el proceso de vuelco de datos, ya que el grado de detalle con que trabajan es elevado. La implementación regional del modelo en el sector meridional de la provincia de Santa Fe (cuencas de los arroyos Pavón y Saladillo) permitió contar con una herramienta de avanzada para la evaluación de impactos en el largo plazo de acciones tales como cambios de uso del suelo, cambios climáticos, y en términos generales para la planificación y gestión del recurso hídrico en dichos sistemas (Mendez y Zimmermann, 2011).

Una primera versión del modelo fue puesta en operación en el sistema hidrológico del arroyo Ludueña, y posteriormente calibrada utilizando información freaticométrica, pluviográfica y limnigráfica del 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 aceptables, 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. Atendiendo a las deficiencias en la información utilizada para la calibración del modelo, se propuso realizar una nueva calibración del SHALL, 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. En ambas versiones del modelo se discretizó espacialmente la cuenca con un nivel de agregación importante (celdas de 15 km² aproximadamente), y toda la información fue procesada en forma manual (artesanal).

En la versión que aquí se presenta, se ha utilizado la misma información de base para la calibración pero la discretización espacial planteada para el modelo es de mucho mayor detalle (celdas regulares de 1 km²) y el tratamiento de la información se realizó utilizando sistemas de información geográfica y con el auxilio de imágenes satelitales aplicando técnicas de teledetección. En este trabajo se muestran los resultados alcanzados en la calibración del modelo con esta nueva resolución espacial, comparándolos con las anteriores versiones.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Descripción del sistema físico estudiado

La cuenca del arroyo Ludueña se encuentra situada al Sur de la provincia de Santa Fe, entre los paralelos 32°45' S y 33°08' S y los meridianos 61°04' O y 60°39' O (Fig. 1). Linda al sur con la cuenca del A° Saladillo, al norte y al oeste con la del A° San Lorenzo y engloba parte del casco urbano de la ciudad de Rosario, desembocando en el río Paraná. Tiene un área de aporte de aproximadamente 740 km², una pendiente media de 1,4 por mil y su cabecera se ubica en la cota 70 IGM.

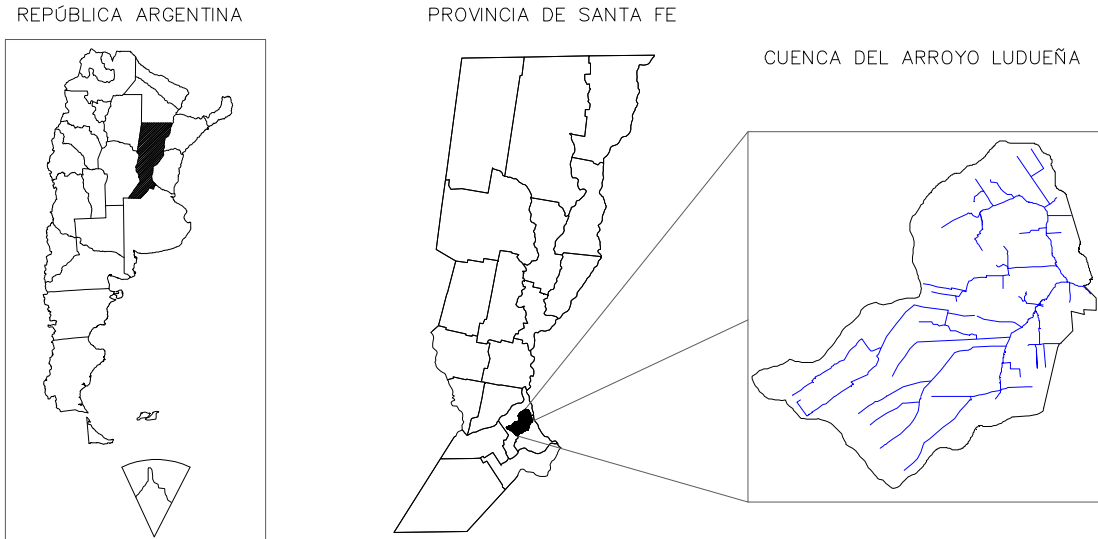


Figura 1 - Ubicación geográfica cuenca del Arroyo Ludueña.

La red hídrica principal está constituida por el A° Ludueña y los canales Ibarlucea y Salvat, mientras que en épocas de lluvia se adicionan numerosos y pequeños cursos naturales (cañadones) y artificiales que aportan al escurrimiento. Al ingresar el arroyo en la ciudad de Rosario es entubado hasta 500 m aguas arriba de su descarga en el río Paraná. El sector norte de la cuenca es drenado mediante dos canales artificiales, Funes-Salvat e Ibarlucea - Nuevo Alberdi.

La región se encuentra atravesada por importantes terraplenes tanto viales como ferroviarios. La red primaria de cursos y canales tiene una extensión de aproximadamente 140 Km, en tanto que con el agregado de cunetas y canales secundarios esta longitud de vías de drenaje alcanza los 360 Km. La densidad de drenaje considerando solamente los cursos naturales es de 0,19 Km/Km², en tanto que al cabo de la alteración antrópica alcanzada a la fecha, la densidad de drenaje asciende a 0,49 Km/Km², lo que conforma un importante indicador del grado de transformación que ha sufrido la cuenca.

2.2 Breve descripción del modelo SHALL

El sistema comprende un modelo hidrodinámico cuasi-3D, que contempla las componentes subterráneas y superficiales de flujos de agua, conjuntamente con los flujos verticales hacia el acuífero y la atmósfera. En cada celda ó unidad de discretización espacial, el modelo SHALL puede cuantificar dinámicamente variables de estado (almacenamientos por interceptión, superficial, en el perfil del suelo y subterráneo) y flujos de intercambio (evapotranspiración, ascenso capilar, escurrimiento superficial, mantiforme y encauzado, a superficie libre y a través de constricciones -puentes, alcantarillas, sobrepaso de terraplenes, etc.-, infiltración, percolación profunda y escurrimiento subterráneo). La aptitud de conectar la hidrología de superficie con la subterránea, lo habilita para realizar predicciones acerca de evoluciones en los procesos hidrológicos provocados por acciones antrópicas a escala de cuenca y en el largo plazo (Fig. 2).

Los procesos superficiales se simulan contemplando porcentajes y tipos de cobertura vegetal, asignándoles etapas de crecimiento radicular y foliar por tipo, y capacidades de interceptión y almacenamiento superficial. El flujo superficial puede ser propagado mediante un espectro de leyes de descarga desde la aproximación cinemática de la ecuación de momentum hasta una aproximación a la ecuación dinámica. Estas leyes permiten la simulación de tránsito de crecida en ríos, canales, valles de inundación, calles urbanas y redes de conductos cerrados.

Los procesos subsuperficiales, tales como la redistribución de humedad en la zona no saturada (ZNS) y los montos de agua intercambiados con la atmósfera y el acuífero, se simulan resolviendo numéricamente la ecuación de Richards. El flujo subterráneo es simulado mediante la ecuación de Boussinesq (Freeze y Cherry, 1979) la cual es resuelta en forma numérica.

Para simular los procesos descritos en el párrafo anterior, el modelo necesita ser dotado de parámetros de superficie, como pendientes, rugosidades, distribución de cultivos, etapas de maduración de los mismos y porcentaje de cobertura. Asimismo requiere de parámetros de la Zona No Saturada (ZNS): curvas de retención de humedad y conductividad hidráulica; y de la Zona Saturada (ZS): conductividad hidráulica y coeficiente de almacenamiento.

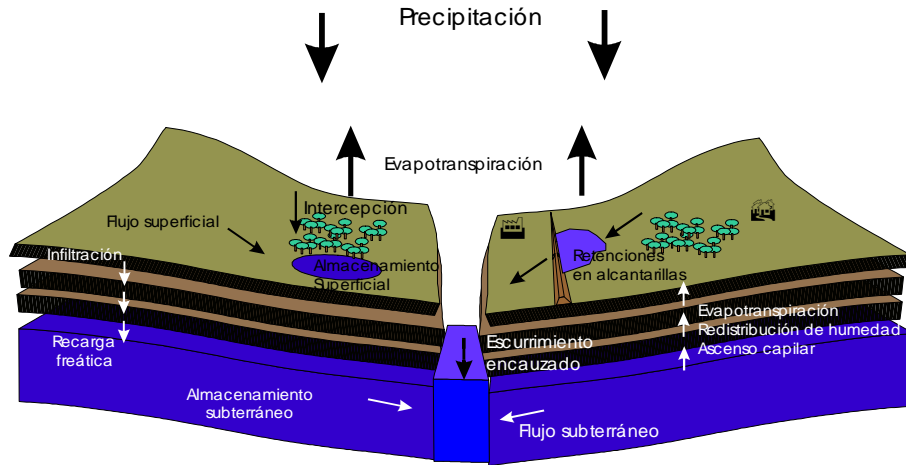


Figura 2 - Esquemática del ensamblaje entre celdas superficiales, no saturadas y subterráneas.

2.3 Parametrización del modelo SHALL.

La implementación del modelo SHALL en la cuenca del arroyo Ludueña, se realizó mediante la delimitación del espacio físico en el cual se encuentra emplazada la cuenca y la caracterización de los parámetros de superficie, de la zona vadosa y la zona saturada que se corresponden con dicha ubicación geográfica.

La discretización espacial adoptada consistió en una grilla de celdas regulares de 1000m de lado en superficie, una grilla de celdas homólogas que representan la zona saturada, vinculadas ambas grillas por 50 “capas de celdas” espaciadas 0,50 m entre sí, que representan la discretización de la zona no saturada. A los diferentes grupos de celdas se les debió asignar información topográfica, de usos de suelo, edáfica, geológica y red de drenaje, etc.

La resolución espacial adoptada para la grilla fue definida con el criterio de no superar el volumen de almacenamiento computacional, acorde con las capacidades informáticas disponibles, pero manteniendo un grado de detalle acorde a las necesidades de modelación.

Para la caracterización de la superficie de la cuenca se utilizaron parámetros topográficos y de cobertura superficial. La topografía se representó mediante un modelo digital del terreno (MDT) que fue generado a partir de las curvas de nivel del Instituto Geográfico Nacional. El modelo estima las capacidades de almacenamiento superficial en función de la topografía. En la Fig. 3 se observa una representación del modelo digital del terreno con la resolución adoptada, que posee la red de drenaje.

Los almacenamientos por interceptación se estimaron en base a tipos de cultivos presentes, recurriendo a valores citados bibliográficamente. Los porcentajes de cobertura del suelo, utilizados por el modelo de interceptación, se estimaron considerando como variables los factores de cultivo, los tipos de cultivos y su grado de crecimiento según día del año. Las curvas de desarrollo del cultivo fueron propuestas según el ciclo vegetativo de cada cultivo.

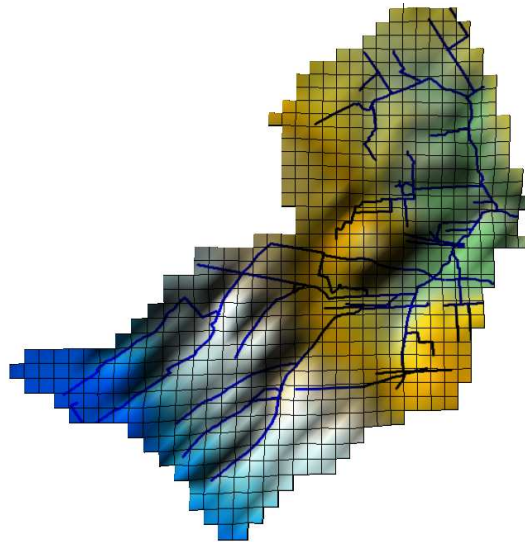


Figura 3 - Modelo Digital de Terreno – Red de drenaje.

La identificación de los distintos tipos de cobertura superficial de la cuenca se realizó mediante la técnica de teledetección, que permitió asignar un uso del suelo a cada celda del modelo. Para esto se utilizó imágenes obtenidas por el satélite Landsat 5, sensor ETM+ e información recopilada en campo, en la zona en estudio. Se realizó un seguimiento del estadio fenológico y el factor de ocupación de los cultivos presentes en 17 lotes de la zona en estudio durante 2 años, con una periodicidad mensual. Utilizando la aplicación de procesamiento de imágenes del programa gvSIG, se determinaron las diferentes coberturas. El tratamiento realizado fue el de clasificación supervisada, para esto se utilizaron todas las bandas menos la térmica (banda 6) y el método elegido fue el de la máxima verosimilitud.

En función del uso del suelo y de los requerimientos del modelo se determinaron 7 tipos de cobertura: Soja, Maíz, Pastura, Suelo desnudo, Sorgo, Girasol y Ciudades. Las ciudades fueron identificadas con un procedimiento paralelo y luego se les aplicó una máscara a los fines de no introducir error en la clasificación debido a dispersión en la firma espectral de sus píxeles.

Finalmente se agregó el tamaño de pixel de la imagen (30 m) al correspondiente al tamaño de grilla del modelo (1000 m). En la Fig. 4 se observa la clasificación supervisada de la imagen original y la agregación al tamaño compatible con la modelación.

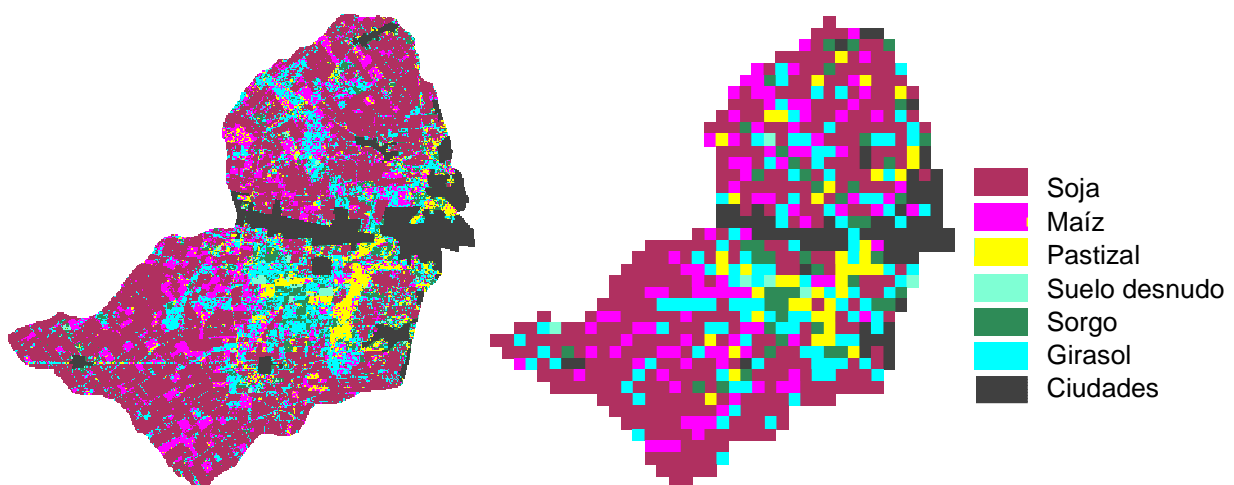


Figura 4 - Clasificación de imagen según cobertura tamaño original de pixel – agregado según modelo.

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. Para la caracterización de las propiedades de la ZNS se partió de la información elaborada por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), que caracteriza los perfiles de suelos presentes en el área de estudio.

Como información de partida se contó con las cartas de suelo digitalizadas y georreferenciadas (Fig. 5a). Esta información fue adaptada al tamaño de discretización adoptado en formato "raster", donde se le asigna a cada celda de 1000m de lado, un tipo de suelo representativo (Fig. 5b).

Definido el tipo de suelo, a cada celda se le asignaron propiedades hidráulicas, que fueron estimadas mediante funciones de pedotransferencia ya probadas en la región de estudio. Previamente a este trabajo fue procesada gran cantidad de información de los suelos de la región, generando una base de datos con propiedades hidráulicas de 204 asociaciones del sur santafesino (Zimmermann y Basile 2008, Zimmermann et al. 2008). De las cartas de suelos disponibles se extractó la información de las series de suelos presentes en las cuencas y se calcularon los parámetros hidráulicos de la ZNS que son empleados por el modelo SHALL: conductividad hidráulica saturada, presión capilar y conectividad de poros para la curva de retención (modelo de Brooks-Corey) y humedades volumétricas residuales y de saturación.

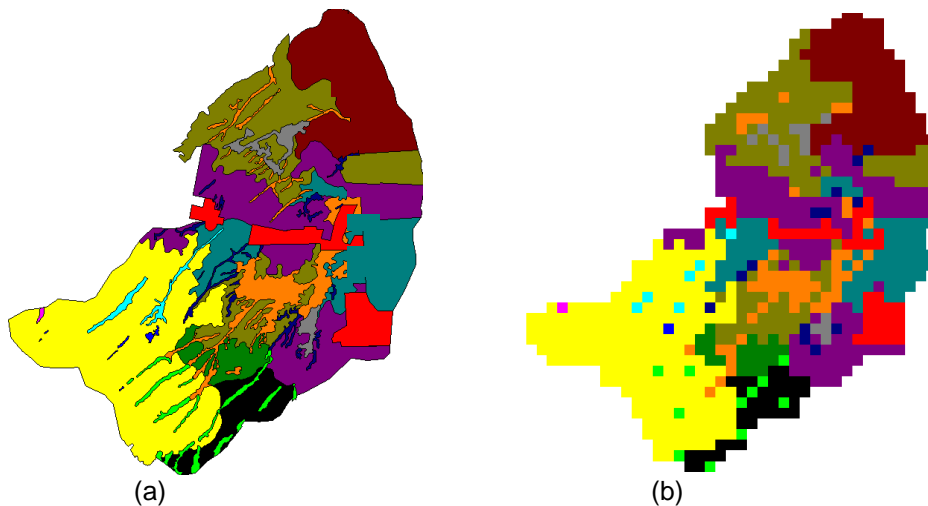


Figura 5 - Tipos de suelo cuenca A° Ludueña. (a) Formato vectorial. (b) Formato ráster.

La caracterización de la zona saturada consistió básicamente en la identificación de las celdas que conforman el paquete saturado para establecer la matriz de conexiones y vinculaciones, la asignación de parámetros hidráulicos por vinculación y por celda saturada y la determinación de las celdas que actúan como condición de borde, ya sea externa o interna.

Los parámetros hidráulicos (coeficiente de almacenamiento S y conductividad hidráulica saturada K), se estimaron como valores iniciales en base a valores característicos regionales.

Como condiciones de borde externas se consideraron: (a) la cota de pelo de agua del río Paraná, que se constituye en cuerpo receptor de los aportes superficiales y subterráneos de la cuenca (nivel medio del río como cota preestablecida) y (b) las divisorias superficiales que se adoptaron como divisorias subterráneas (condición de flujo nula para las celdas adyacentes a la divisoria superficial).

Como condiciones de borde internas se consideraron los cursos de agua permanentes que descargan la freática (cota preestablecida en cada tramo adyacente a celdas internas del modelo).

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Información de entrada

Se contó con registros pluviográficos digitalizados de tres estaciones de la región en estudio, registros pluviométricos en otras dos estaciones, registros diarios de evaporación de tanque "A", registros freaticos diarios en una estación, registros freaticos horarios en otra y registros limnográficos horarios digitalizados en dos secciones de control (Fig. 6). Se utilizaron para calibración los datos correspondientes al año 1994.

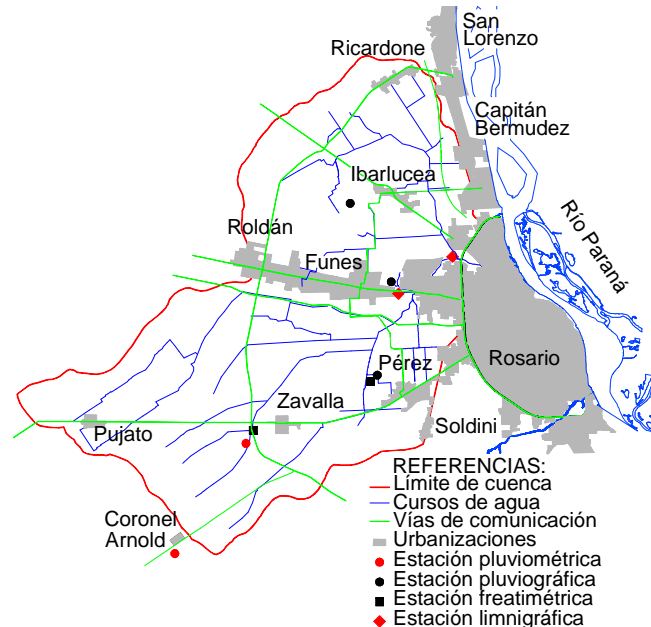


Figura 6 - Ubicación estaciones de medición.

Con la información pluviográfica, proveniente de las estaciones Rosario Aero, Pérez e Ibarlucea, se construyeron hietogramas con paso horario. Luego, con la información pluviométrica registrada en las estaciones Cnel. Arnold y Zavalla, se construyeron hietogramas sintéticos con paso horario (Zimmermann, 2002). Utilizando 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 mediante un algoritmo computacional que utiliza el método de polígonos de Thiessen.

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 (Zimmermann, 2002).

3.2 Calibraciones del modelo

En la configuración previa del modelo, el sistema hidrológico del arroyo Ludueña fue subdividido en un conjunto de celdas de características ó parámetros homogéneos, de esta manera la constitución del modelo se realizó mediante celdas irregulares o amorfas (Fig. 7a). 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.

El conjunto de parámetros sujetos a la calibración fueron: dos coeficientes de ajuste zonal para las conductividades hidráulicas verticales (uno para el sector del arroyo Ludueña propiamente dicho, KvL y otro para el sector del canal Ibarlucea, KvI), la presión capilar (Pb) y conectividad de poros de las curvas de retención del suelo (b) y dos coeficientes globales que ajustan las

conductividades hidráulicas horizontales (K_h) y los coeficientes de almacenamiento (S). Esto totaliza una cantidad de 6 coeficientes de ajuste (Tabla 1).

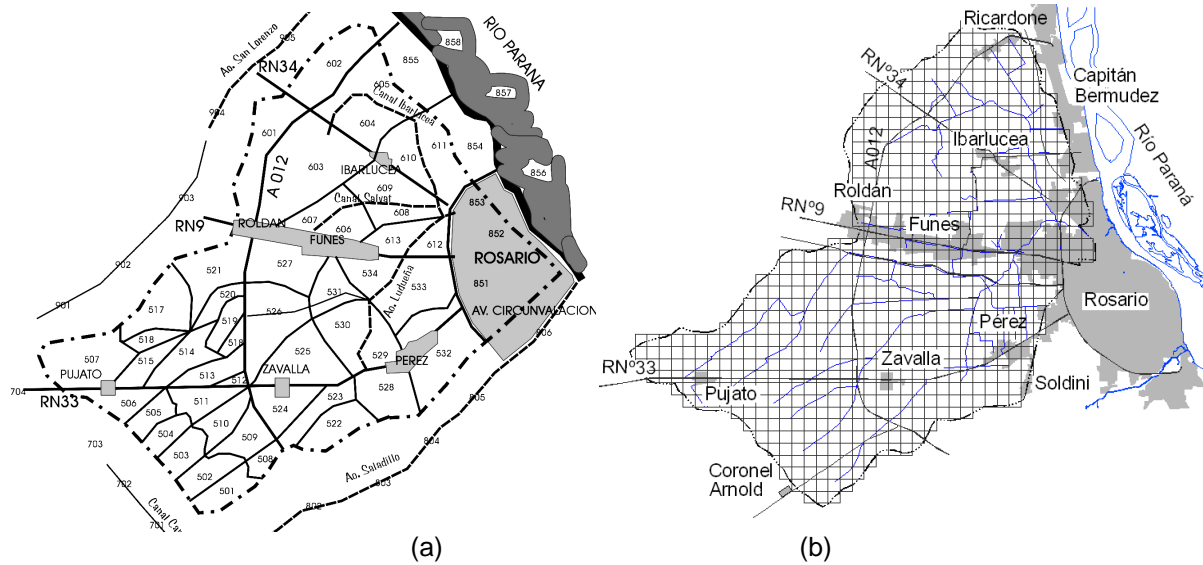


Figura 7 - Configuración del modelo. (a) Celdas amorfas. (b) Celdas regulares.

En la configuración actual, la estructuración del modelo permitió una simulación cuasi-tridimensional del flujo totalizando cerca de **40.000** elementos de discretización. Los parámetros que fueron sometidos a la calibración consistieron en: un coeficiente de ajuste global para las conductividades hidráulicas verticales (K_v) en la ZNS, y dos coeficientes globales que ajustan las conductividades hidráulicas horizontales (K_h) y los coeficientes de almacenamiento (S) en la ZS, totalizando tres parámetros de ajuste (Tabla 1).

3.3 Comparación entre las calibraciones

El ajuste para ambas calibraciones se realizó utilizando una función objetivo (FO), la cual se debió minimizar. La función presenta la siguiente forma:

$$FO = \log[EQ.EZF.(1-r_1).(1-r_2)] \quad (1)$$

donde EQ es el error cuadrático asociado a las láminas de precipitación neta observadas y calculadas, EZF está asociado a los errores cuadráticos medios entre los niveles freáticos observados y calculados, en tanto r_1 y r_2 son coeficientes de correlación entre las series observadas y calculadas de estos niveles, como se describe más adelante.

Para el caso del escurrimiento superficial, el error cuadrático medio fue derivado para un conjunto de tormentas de gran magnitud en la sección de control ubicada en Golf Club, donde se cuenta con registros limnigráficos.

$$EQ = \sqrt{\sum_{i=1}^n (QC_i - QO_i)^2} \quad (2)$$

donde QC_i son las láminas netas calculadas para la tormenta i en la estación de control, en tanto que QO_i representan las láminas observadas. Para el ajuste de los niveles freáticos se consideró la función de errores:

$$EZF = \left[\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ZFOZ_i - ZFCZ_i)^2} + \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (ZFOPI_i - ZFCPI_i)^2} \right] * 0.5 \quad (3)$$

donde ZFOZ_i y ZFOPI son los niveles freáticos observados en los freatómetros de Zavalla y Pérez, respectivamente, mientras que ZFCZ_i y ZFCPI son los niveles simulados en las celdas adyacentes a las estaciones de registro. El subíndice *i* representa el evento lluvioso para el cual se registraron los niveles simulados. Esta función implica un promedio de los errores cuadráticos medios para ambas estaciones. Los coeficientes de correlación entre las series observadas y calculadas de niveles freáticos, r_1 y r_2 , se calcularon para cada una de las dos estaciones freatométricas.

Tal como se mencionó en el apartado 3.2, en la versión actual del modelo se contempló un solo coeficiente de ajuste para las conductividades hidráulicas verticales asociadas a los suelos presentes en la cuenca K_v , mientras que en la versión anterior se utilizaron dos coeficientes de ajustes zonales K_v , uno para los suelos de la región del canal Ibarlucea $K_v(I)$ y otro para los correspondientes al arroyo Ludueña $K_v(L)$. No obstante, la principal modificación respecto a los parámetros de la versión anterior es que las curvas de retención del suelo de cada celda se obtuvieron aplicando funciones de pedotransferencia considerando los suelos presentes y por lo tanto, en la versión actual no fueron objeto de ningún tipo de calibración los parámetros P_b y b .

Los parámetros ajustados y los óptimos encontrados se muestran en la Tabla 1. Allí también se detallan los óptimos encontrados para cada función error por separado y la función objetivo general FO.

Tabla 1 – Resumen de parámetros y errores en ambas calibraciones.

Versión	Parámetros medios areales ajustados						Funciones de errores y objetivo			
	$K_v(L)$	$K_v(I)$	P_b	b	K_h	S	EQ	EZF	$r_1 * r_2$	FO
	(m/d)	(m/d)	(m)	$Adim$	(m/d)	$adim$	(mm)	(m)	$adim$	$adim$
50 celdas irregulares	0,054	0,043	2,67	1,8	5	0,04	11,93	0,86	0,71	0,16
740 celdas regulares	0,033		-	-	6,4	0,09	5,62	0,48	0,57	-0,93

Referencias: EQ: error medio cuadrático de escurrimientos (ec. 2), EZF: error medio cuadrático de niveles fráticos (ec. 3), $r_1 * r_2$, producto de coeficientes de correlación para las series temporales de niveles en cada una de las dos estaciones freatométricas, FO: función objetivo general (ec. 1).

En la Tabla 1 se evidencia que para el nuevo conjunto de parámetros los errores cuadráticos medios, tanto en escurrimientos como en niveles freáticos se han reducido y consecuentemente se ha reducido la FO general. Se ha alcanzado con una configuración de mayor grado de detalle y menor cantidad de parámetros de calibración (modelo más parsimonioso), un mejor ajuste a los valores observados en la cuenca. En las Fig. 8 (a) y 8 (b) se muestran las gráficas de ajustes de láminas netas y niveles freáticos observados y calculados en el período de simulación (versión última del modelo). La nueva configuración detallada del modelo implica una mayor aplicabilidad porque los parámetros que se involucran están físicamente basados.

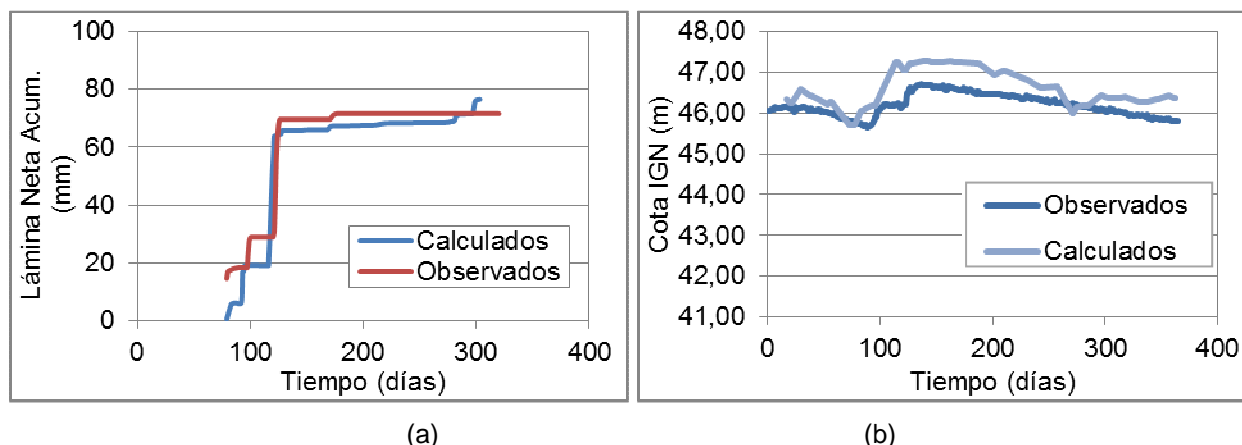


Figura 8 - Comparación entre series observadas y calculadas (a) Láminas netas. (b) Niveles Freáticos.

4 CONCLUSIONES

Se ha realizado la implementación y calibración del modelo de simulación hidrológica cuasi-3D denominado SHALL en la cuenca del Arroyo Ludueña (740 km²), ubicada en el sur santafesino.

La gestión de información necesaria se realizó mediante el uso de SIG, adoptando una discretización espacial mediante celdas regulares de 1000 m de lado, siendo inédito el nivel de detalle alcanzado hasta el momento.

Si bien el modelo presenta parámetros físicamente basados, algunos fueron calibrados en forma global, planteando una función objetivo combinada a minimizar, definida en función de coeficientes de correlación y errores cuadráticos en los escurrimientos y niveles freáticos. En la versión que aquí se presenta, se ha utilizado la misma información de base para la calibración que en la configuración anterior. Se contó con datos pluviográficos y pluviométricos en 5 estaciones, registros de una estación de evaporación de tanque "A", limnigramas y aforos en dos secciones de control y freaticimetría en dos pozos de observación.

Sumado al mejor nivel de detalle de esta versión, se consideró además la menor cantidad de parámetros a calibrar. Esto último fue posible debido a la mayor cantidad de información disponible para la caracterización de la zona no saturada en la modelación.

Los resultados alcanzados mejoran ampliamente el ajuste obtenido para la implementación previa del modelo conformado con mayor grado de agregación. Esta mejora sería atribuible al mayor grado de detalle alcanzado en la discretización espacial del modelo.

5 REFERENCIAS

- Freeze, A. y Cherry, J., 1979. *Groundwater*. Prentice Hall. 604 pp.
- Méndez Zacarías, J.S. y Zimmermann, E. D., 2011. Uso de Sistemas de Información Geográfica para Parametrización de Modelos de Simulación Hidrológica en Llanuras. *XXIIIº Congreso Nacional del Agua*. Resistencia, Chaco, Argentina. 20 p.
- Zimmermann, E. D. y Riccardi, G., 2000. Modelo de Simulación Hidrológica Superficial y Subterránea para Áreas de Llanura. *Congreso Latinoamericano De Hidráulica*, 2000, Córdoba. AIH Volúmenes del Congreso. Córdoba, 2000. v.2. p.169 – 178.
- Zimmermann, E. D., 2002. Modelo Hidrológico Superficial y Subterráneo desarrollado para la Simulación de Sistemas de Llanura. 2. Estrategias para la Calibración. *XXXII IAH Congress. International Association of Hydrogeologists*. Mar del Plata. Volúmenes de Congreso. Groundwater and Human Deveopment (Eds. Bocanegra E, Martinez D y Massone H) p.750 – 760.
- Zimmermann, E. D. y Basile, P., 2008. Uso de Funciones de Pedotransferencia para la Estimación de Parámetros Hidráulicos En Suelos Limosos (Llanura Argentina). *Boletín Geológico y Minero de España Journal of Earth Sciences*. Vol. 119 (1). p71-80.
- Zimmermann, E. D., Scuderi, C. M., Riccardi, G., Stenta, H. R., Basile, P. A., García, M. L. y Rentería, J. P., 2008. Asignación de Parámetros Hidráulicos de Suelos Utilizando Funciones de Pedotransferencia con Información de las Cartas de Suelo del INTA. Capítulo 2. *Modelación de procesos hidrológicos asociados al escurrimiento superficial en áreas de llanura*. UNR editora. Rosario. Argentina. ISBN 978-950-673-691-0. p145-156.