

Empleo del modelo hidrológico SWAT en regiones de llanuras. Aplicación en una cuenca rural, arroyo Santa Catalina, Prov. de Buenos Aires

Cristian Guevara Ochoa¹, Georgina Cazenave¹, Gabriel Vazquez Amábile², Guillermo Collazos¹, Luis Vives¹

¹ Instituto de Hidrología de Llanuras "Dr. Eduardo J. Usunoff" (IHLLA). Republica de Italia 780, Azul, Argentina.

² Centro Regional de Experimentación Agrícola (CREA) Sarmiento 1236 5to piso, Buenos Aires, Argentina.

Mail de contacto: Ingguevara8a@gmail.com

RESUMEN

Las regiones de llanuras son escenarios frágiles ante extremos hídricos que generan conflictos sociales, políticos y económicos. Extensas áreas son afectadas por estos extremos, en el caso de excesos hídricos la incapacidad del relieve para evacuar volúmenes importantes de agua y el aumento de niveles freáticos producen anegamientos, mientras que en sequía la disminución del recurso hídrico afecta más gravemente a la producción. Para cuantificar los procesos de extremos hídricos en la Pampa deprimida, se implementó el modelo SWAT en la cuenca del arroyo Santa Catalina (área 138 Km²). Este modelo matemático semidistribuido continuo permitió modelar el flujo subterráneo y la escorrentía superficial con el fin de analizar los impactos del uso del suelo. Se simuló un periodo de 10 años (2003-2012) con extremos de inundaciones y sequías, considerando un calentamiento de 3 años (2003-2005). La evaluación estadística diaria de los resultados muestra que SWAT puede reproducir el caudal con coeficientes de eficiencia de Nash Sutcliffe (*NSE*) de 0.66 para el periodo de calibración (2006-2007) y 0.74 para validación (2011-2012). Con los resultados se construyeron mapas de distribución del escurrimiento superficial y de la recarga del acuífero. A partir de este trabajo se proponen recomendaciones a tener en presente para simular procesos hidrológicos en áreas de llanura.

Palabras Clave: Llanuras, Anegamiento, SWAT.

ABSTRACT

Plain landscapes are usually exposed to extreme hydrological events that generate social, political and economic conflicts. Large areas are affected by these extremes. In the case of water excesses, flat relief makes difficult to drain surface water away giving rise to waterlogging and groundwater table rising. Conversely, droughts affect production due to the lack of surface and ground water. To quantify extreme hydrologic processes in the "Depressed Pampa", the SWAT model was evaluated at the Santa Catalina creek Watershed (138 km²). This mathematical, continuous and semi-distributed model allowed modeling groundwater flow and surface runoff, in order to analyze the impact of land use changes. SWAT was used to simulate a 10-year period (2003-2012), with extremes of flood and drought, considering a warming-up period of 3 years (2003-2005). A statistic evaluation showed that SWAT was able to predict daily flows, with a Nash Sutcliffe Efficiency (*NSE*) of 0.66 for the calibration period (2006-2007) and 0.74 at validation (2011-2012). Model outputs were used to build maps in order to analyze surface runoff patterns, as well as groundwater recharge areas in the aquifer. In this work, some recommendations are discussed to be taken into account when hydrologic processes are simulated in flat watersheds.

Keywords: Plains, Waterlogging, SWAT.

1 INTRODUCCIÓN

Uno de los impactos desfavorables de la variabilidad climática se observa en los niveles socioeconómicos de los productores debido a la alternancia de sequías e inundaciones a lo largo del tiempo en la provincia de Buenos Aires. En la actualidad se busca cuantificar los procesos de extremos hídricos en la pampa deprimida, para que sirvan de base para la implementación de proyectos que generen buenas prácticas agronómicas (mantengan los suelos porosos y permeables), forestación (absorba la humedad y reduzca el escurrimiento) con el fin obtener un manejo integral del recurso hídrico. Esta iniciativa es de vital importancia para el manejo de los recursos en el partido de Azul, en su mayoría agrícolas que generan según el Centro de Empresarios de Azul (CEDA, 2011) un producto bruto geográfico (PGB) de US\$ 157.940.000 y sirven como aporte para la planificación y el ordenamiento regional.

El partido de Azul, situado en un sector de la pampa húmeda en la provincia de Buenos Aires, es afectado periódicamente por estos fenómenos provocados por un desequilibrio climático causando grandes pérdidas en la zona rural y urbana. La ciudad de Azul se encuentra en la zona central de la cuenca del arroyo del Azul, con una población de 65.280 habitantes (INDEC, 2010). La planta urbana se encuentra a la salida de la cuenca superior, que tiene una extensión de 1135 km² con una cabecera serrana que luego se transforma en una llanura de transición.

Para este estudio se escogió el arroyo de Santa Catalina, uno de los afluentes más importantes de la cuenca del arroyo Azul, debido a que es una subcuenca representativa para el análisis y comparación de los resultados del software utilizado y cuenta con la información necesaria hidrometeorológica, tipos de suelos y uso de la suelo para la simulación de los escenarios propuestos.

En este artículo se presenta una metodología para conocer, cuantificar y entender la dinámica de los excedentes superficiales y la disponibilidad de agua en épocas de sequía debido perturbaciones antrópicas que inciden sobre los sistemas hidrológicos no típicos (Zimmerman, 1999).

Los objetivos principales de este trabajo son comprobar la utilidad del modelo SWAT en regiones llanas, cuantificar la variación de los extremos hídricos y proponer recomendaciones que deben tenerse en cuenta para simular procesos hidrológicos con modelos semidistribuidos en áreas de llanura

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio

La cuenca del arroyo Azul (Fig. 1) se encuentra ubicada en el centro de la provincia de Buenos Aires, entre los 58° 51' y 60° 10' de longitud oeste y 36° 09' y 37° 19' de latitud sur. Abarca una superficie de 6.237 km², cubriendo casi la totalidad del partido de Azul, junto con algunos sectores de los partidos de Las Flores, Rauch, Tapalqué, Olavarría y Benito Juárez.

Esta cuenca nace en la localidad de Chillar (60 km al sur de la ciudad de Azul) y sus aportes más importantes son los afluentes del arroyo Videla con una superficie de 135 km² y el arroyo Santa Catalina con (138 km²).

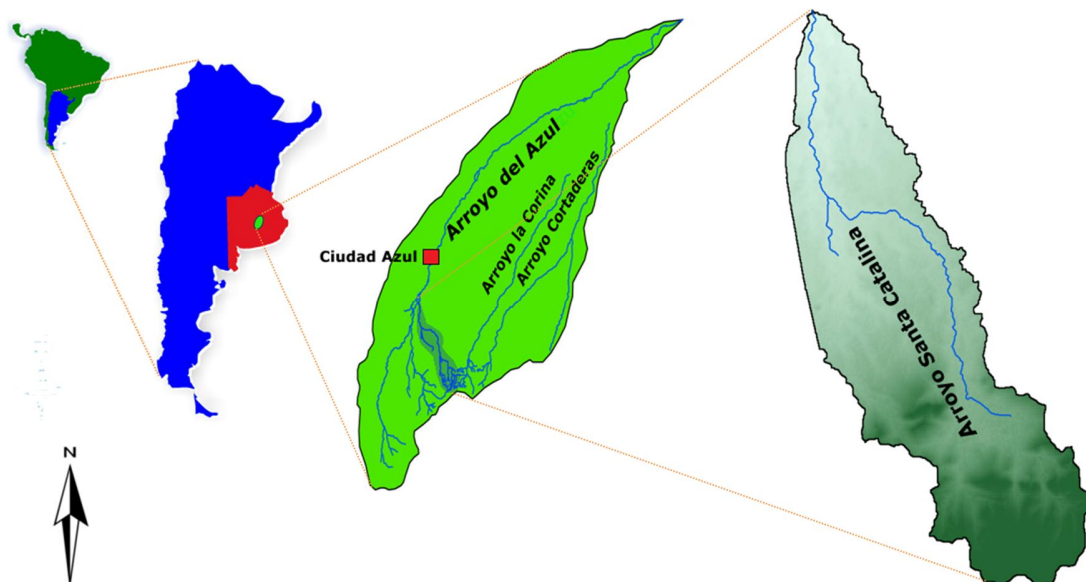


Figura 1 - Ubicación de la cuenca Santa Catalina

La subcuenca del arroyo Santa Catalina tiene una altitud que varía entre 360-152 msnm, se escogió esta cuenca debido a la similitud en cuanto a las características fisiográficas con la cuenca del arroyo del Azul, ya que posee una cabecera serrana que se transforma en su parte media-baja en una llanura de transición. Esta parte presenta un relieve ondulado con depresiones donde predominan los movimientos verticales de agua: precipitación, evapotranspiración y almacenamiento sobre los horizontales.

2.2. Programa SWAT

El SWAT (Soil and Water Assessment Tool) es una herramienta para evaluar el agua y el suelo desarrollado para evaluar los efectos de la gestión alternativa de decisiones sobre los recursos hídricos (Srinivasan et al., 1994). Es un modelo semidistribuido que permite simular una explotación agropecuaria extensiva (Arnold et al., 1996). Este modelo matemático reproduce diferentes procesos físicos en las cuencas hidrográficas con el fin de analizar los impactos de los cambios de uso del suelo en el flujo subterráneo y la escorrentía superficial, en cuencas agrícolas.

SWAT divide la cuenca en múltiples subcuencas, que a su vez se subdividen en unidades de respuesta hidrológicas (HRUs) homogéneas en cuanto al uso de la tierra, topografía y las características del suelo.

El balance de agua simulado por SWAT se basa en la siguiente ecuación de equilibrio (Neitsch et al., 2005):

$$SW_t = SW_o + \sum (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

donde SW_t es el contenido final de agua en el suelo (mm); SW_o es el contenido de agua inicial en el día i (mm); t es el tiempo (día); R_{day} es la cantidad de precipitación en el día i (mm); Q_{surf} es el escurrimiento superficial en el día (mm); E_a es la evaporación en el día (mm); W_{seep} es la cantidad de agua acumulada en la zona no saturada del perfil del suelo en día i (mm); Q_{gw} es la cantidad de flujo de retorno en el día i (mm),.

La metodología se encuentra dividida en dos fases: i) procesamiento de datos de entrada (ver Fig. 2); ii) aplicación del modelo.



Figura 2 - Datos de entrada para simular procesos con el modelo SWAT

2.3 Datos de entrada

SWAT requiere información climática diaria de precipitación (mm), temperatura máxima y mínima (°C), humedad relativa (%), velocidad del viento (m/seg), radiación solar (MJ/m²) y evapotranspiración potencial (mm). Se utilizaron 3 estaciones climáticas completas (Tabla 1), dos estaciones pertenecientes al Instituto de Hidrología de Llanuras (IHLLA) y una perteneciente al Servicio Meteorológico Nacional (SMN). La radiación diaria que puede alcanzar la superficie depende de su ubicación y el período del año. Debido a las diferencias en la posición del sol, la radiación difiere en varias latitudes por lo que en este estudio la radiación y la evapotranspiración potencial diaria fueron calculadas por medio del software Cropwat 8.0 desarrollado por Joss Swennenhuis (FAO, 2009). En este estudio se aplica la ecuación de Penman Monteith (Allen et al., 1998).

Tabla 1 - Ubicación de las estaciones climáticas utilizadas en el modelo SWAT.

ID	NOMBRE	PERTENECE	XPR(m)	YPR(m)	ELEVACIÓN (msnm)
1	AZUL	SMN	5.510.000	5.924.000	145
2	FIRMEZA	IHLLA	5.502.912	5.908.680	185
3	SIEMPRE AMIGOS	IHLLA	5.513.341	5.903.983	190

Para la información topográfica se utilizó el modelo de elevación digital del terreno (DEM) SRTM Shuttle Radar Topography Mission (NASA, 2001). En estudios hidrológicos es necesario tener en cuenta que deben corregirse en los DEM los efectos por árboles, depresiones, caminos y canales que producen incertezas o distorsiones locales. Además, en zonas de llanuras el SRTM no representa la mayoría de los cauces naturales y artificiales porque éstos son “cortes” de pocos metros de ancho y profundidad en un terreno plano (Scioli, 2010). Estos errores se corrigen ajustando las alturas del SRTM, con respecto a imágenes Landsat o vectores de caminos o canales. Es necesario usar varias fuentes de información, tales como cartas IGM o imágenes satélites para complementar la información del SRTM.

Este DEM tiene una referencia en XY de 30 metros datum WGS 1984 (sistema de carácter elipsoidal). Para la cuenca se corrigió el DEM por medio de un levantamiento con GPS diferencial en datum EGM 2008 (sistema de carácter geoidal) con el fin de corregir las aturas elipsoidales ya que el modelo no reproducía la altura en algunos sectores, principalmente en el sector de la ruta nacional N°3 al oeste de la cuenca cuyo terraplén es una barrera al flujo (Fig 3a).

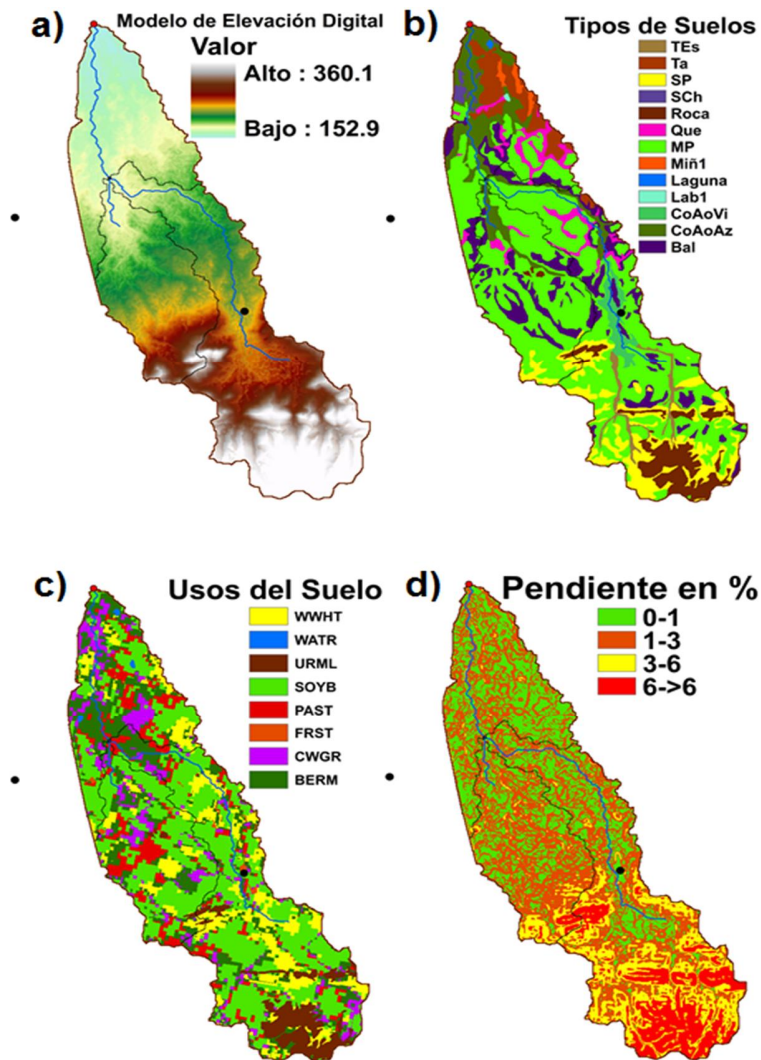


Figura 3 - a) Modelo de elevación digital SRTM de 30 metros; b) Mapa de tipos del suelo INTA, 1992; c) Mapa de usos del suelo Entraigas ,2008; d) Mapa de pendientes en %. Los puntos negros son las estaciones hidrometeorológicas y el punto rojo es la estación limnimétrica

Para la información del tipo de suelos se utilizó el mapa del Instituto Nacional Tecnológico Agropecuario (INTA, 1992) que se encuentra a escala 1:50000, digitalizado por Entraigas (2008). Para utilizar el mapa como entrada en el modelo SWAT, se extrajo la información de la cuenca por medio máscara y se rasterizó a un pixel 30 x 30 m. En la cuenca de Santa Catalina se encuentran 11 series de suelo Fig. 3b con una dominancia de las series Mar del Plata, Balcarce, Sierra de los Padres y Arroyo Azul.

SWAT también requiere información de usos del suelo por lo que se utilizó el mapa generado por Entraigas (2008), clasificado mediante imágenes satelitales (Sac-C) aptas para la detección de actividades agropecuarias y el empleó el índice de vegetación de diferencia normalizada NDVI (Normalizad Difference Vegetation Index) para lograr una discriminación más ajustada de las distintas coberturas.

En la cuenca de Santa Catalina las coberturas están fundamentalmente asociadas a usos agrícolas y ganaderos con un dominio de los cultivos de secano como la soja y el trigo. Estos cultivos tiene ciclos vegetativos cortos con un desarrollo de raíces no muy profundas, con buen rendimiento

en estas áreas. En la Fig. 3c se observa la distribución espacial de las coberturas en la cuenca de Santa Catalina.

2.4 Aplicación del modelo

Con el fin de cuantificar las sequías y las inundaciones en detalle se implementó la rotación de cultivos la cual es una de las opciones de manejo que tiene implícito el modelo SWAT. Se dieron diferentes rotaciones dependiendo del tipo de cultivos, si es de invierno (se plantan en el mes de julio y se cosechan en el mes de diciembre) y los cultivos de verano (se siembran en el mes de noviembre y se cosechan el mes de abril).

Al correr el DEM corregido en el programa SWAT se genera un mapa de pendientes, el cual es importante para calcular el movimiento de agua en el suelo como la escorrentía superficial, el flujo subsuperficial y el tiempo de concentración en la cuenca. En la Fig. 3d se distinguen dos zonas bien diferenciadas: una zona con una pendiente <3% la cual hace referencia a una zona deprimida, y una zona de sierras con pendientes >3%. En zona de llanura se necesita una topografía de detalle que permita comprender el movimiento del agua, ya que cualquier pequeño cambio en la pendiente conlleva a un cambio en la dirección y volumen del flujo escurrido.

3. RESULTADOS

Los resultados se presentan en tres etapas: análisis de sensibilidad; calibración y validación; análisis de resultados.

3.1. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es el proceso que determina la tasa de cambio en la salida del modelo con respecto a los cambios en las entradas del modelo (parámetros). Es necesario identificar los parámetros y la precisión de los parámetros requeridos para la calibración. El análisis de sensibilidad utiliza el método LH-OAT que realiza un muestreo LH seguidos por Muestreo OAT (Van Griensven et al., 2006). El análisis para la cuenca del arroyo Santa Catalina confirma la importancia de los parámetros que controlan la componente vertical del movimiento de agua en el suelo. En la Fig. 4 se observa que los parámetros CN2 (curva numérica de condición de humedad II) y ESCO (Factor de compensación de evaporación del suelo) son los más sensibles del modelo, seguidos por Sol Z (máxima profundidad del perfil del suelo), Gwqmn (nivel umbral del acuífero libre para un flujo normal) y Sol Awc (Capacidad de disponibilidad de agua en el perfil del suelo).

En la etapa de calibración se busca lograr un set de parámetros hidrológicos que permitan obtener una representación de caudales que asemejen a los datos históricos de la forma más cercana posible. Una vez elegidos los parámetros que mejor ajustan se procede a la validación de este conjunto de datos. El modelo SWAT permite variar porcentualmente el set de parámetros originales. En la Tabla 2 se presentan los valores óptimos de cada parámetro que mejor ajustan a los valores observados.

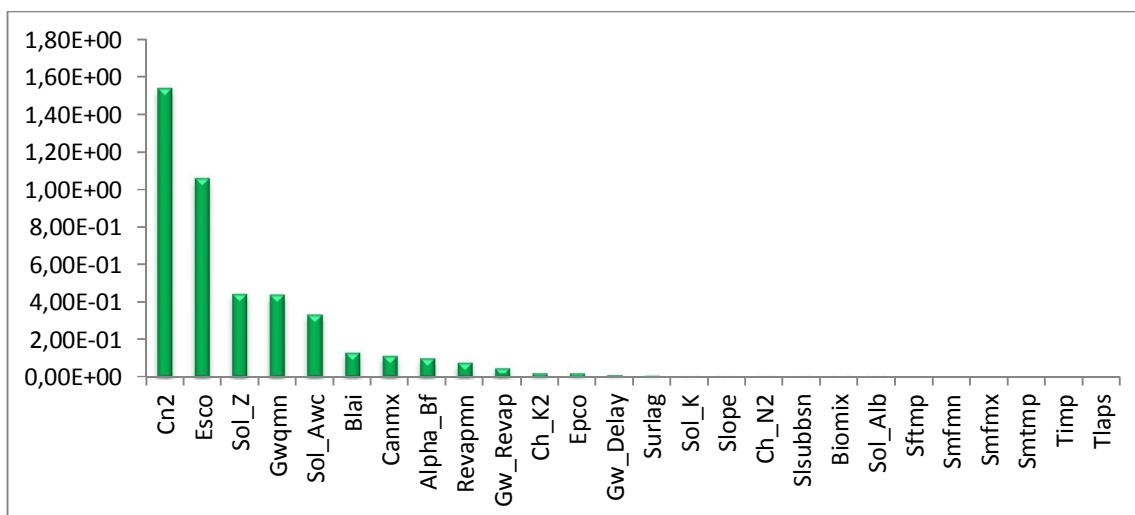


Figura 4 - Rango de sensibilidad de parámetros de flujo para la cuenca de Santa Catalina

Tabla 2 - Clasificación de los ocho parámetros más sensibles y su rango de ajuste para la cuenca de Santa Catalina.

GRUPO	PARÁMETRO	DESCRIPCIÓN	RANGO	SENSIBILIDAD	PARÁMETROS AJUSTADOS
Infiltración	CN2	Escorrimiento inicial condición de humedad II	± 25 %	ALTA	-20%
Evaporación	ESCO	Factor compensación evaporación del suelo	0 - 1	ALTA	0.1
Suelo	SOL_AWC	Disponibilidad de agua en el suelo	± 50%	ALTA	30%
Agua Subterránea	GWQMN	Umbral de profundidad del agua acuífero libre	0 - 1000	ALTA	600
Suelo	SOL_Z	Profundidad del perfil del suelo	± 30 %	MODERADA	-5%
Agua Subterránea	ALPHA_BF	Factor alfa flujo base	0 - 1	MODERADA	0.1
Agua Subterránea	REVAPMN	Umbral de profundidad acuífero libre para evaporar	0 - 1000	BAJA	100
Escorrimiento	SLSUBBSN	Longitud de la pendiente promedio	1 - 1000	BAJA	1000

3.2. Calibración y validación

Para la calibración del modelo en la cuenca en estudio se analizó un periodo de 10 años de (2003-2012), tomando un periodo de calentamiento del modelo o “warm up” de 3 años (2003-2005). La calibración Fig. 5 se realizó para el periodo 2006-2007 y la validación Fig. 6 para el periodo 2011-2012. Se escogieron estos periodos ya que se necesitaban dos periodos similares para el análisis, uno moderadamente seco y otro húmedo.

Para evaluar la precisión del modelo en la cuantificación del flujo se comparan los caudales de datos observados con los calculados y se determinan técnicas estadísticas como el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el coeficiente de determinación (R^2) y el PBias o desviación relativa de los caudales Tabla 3.

Analizando los resultados estadísticos según Moriasi et al. (2007) se encontró que el modelo representa muy bien los procesos de flujo diario en la cuenca ya que se obtuvo valores que se encuentran sobre los rango de $0.65 < NSE \leq 0.75$ y un $\pm 10 \leq Pbias < \pm 15$.

Tabla 3 - Resultados estadísticos calibración y validación diaria de la cuenca Santa Catalina.

PERIODO	NSE	(R2)	Pbias
2006-2007	0.66	0.82	10.4
2011-2012	0.74	0.86	-14.1

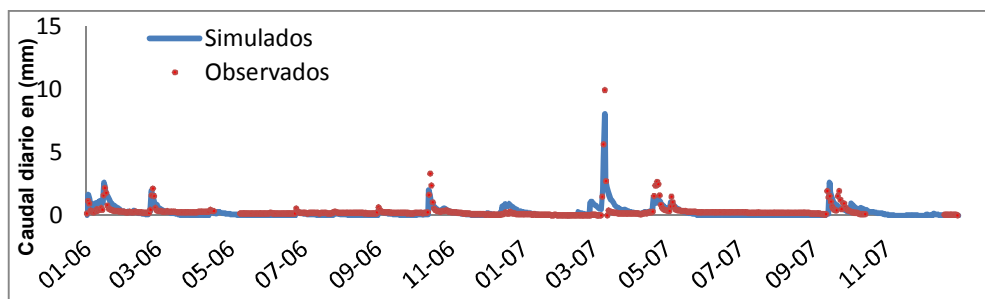


Figura 5 - Caudales observados y simulados diarios periodo de calibración (2006-2007)

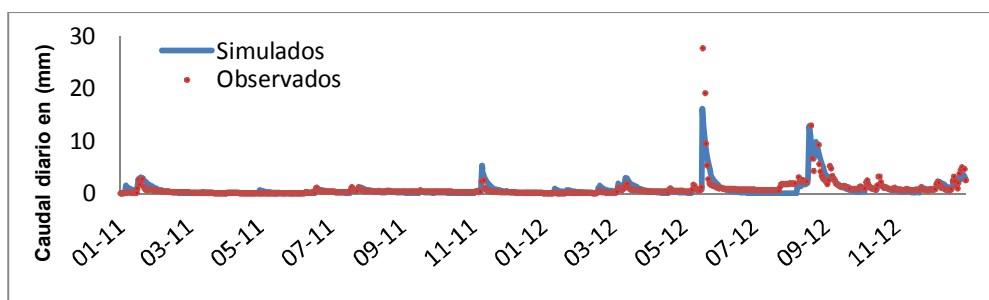


Figura 6 - Caudales observados y simulados diarios periodo de validación (2011-2012)

3.3 Análisis de resultados

En la Fig. 7 se muestran los resultados del balance de agua diario para el periodo de (2006-2012) para la cuenca de Santa Catalina. Se observa la alternancia de ciclos secos como en el 2008 (cuando se declaró desastre agropecuario en toda la provincia de Buenos Aires) y húmedos como el 2012 (que tuvo a gran parte de la provincia anegada).

En el análisis del periodo de sequía se encontró que el almacenamiento de agua que tiene el suelo es muy bajo, debido a la alta evapotranspiración sumado al déficit pluviométrico el cual fue de 591 mm anuales, de los cuales se evaporaron 570 mm (casi 96% del total precipitado). Esto generó que el arroyo se seque totalmente y se generen pérdidas socioeconómicas importantes para la región debido a la disminución del almacenamiento agua.

En cuanto a los ciclos de excesos hídricos se observa que en el año 2012 (Fig. 7) se produjeron 3 grandes inundaciones en la cuenca, una en el mes de mayo y otras dos contiguas en agosto. La precipitación anual fue de 1246 mm, de los cuales se escurrieron de 75 mm (6 % del total de la precipitación anual).

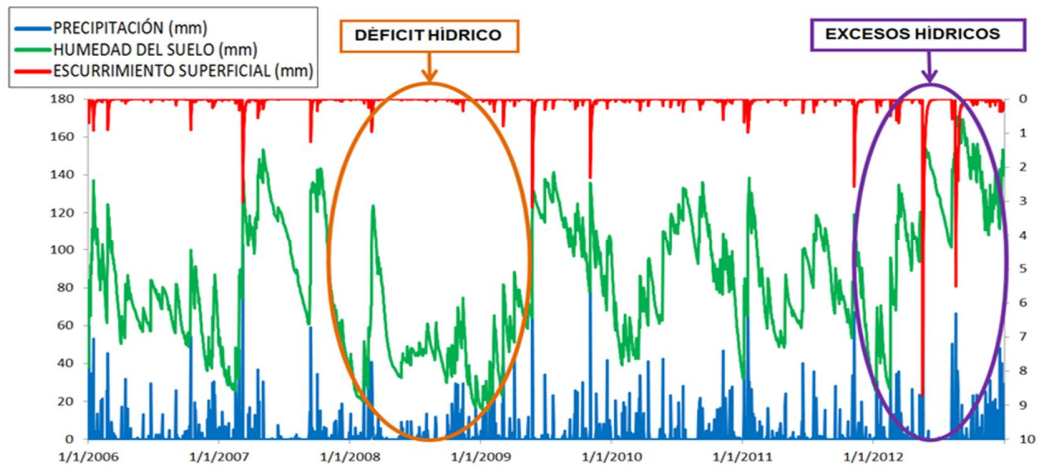


Figura 7 - Precipitación, humedad del suelo y escurrimiento superficial diarios calculados por el modelo SWAT para el periodo de 2006-2012

En la Fig. 8 se presentan mapas de zonas potenciales de riesgo hídrico para la cuenca de Santa Catalina. Los resultados obtenidos en la recarga de la cuenca de Santa Catalina Fig. 8.a se contrastan con los resultados de Varni (2005), y se concluye que hay una similitud en resultados, la mayor recarga de agua se producen en la zona de sierras con un promedio anual de recarga mayor a 180 mm/año de agua y en la zona interserrana valores de 33 a 87 mm/año.

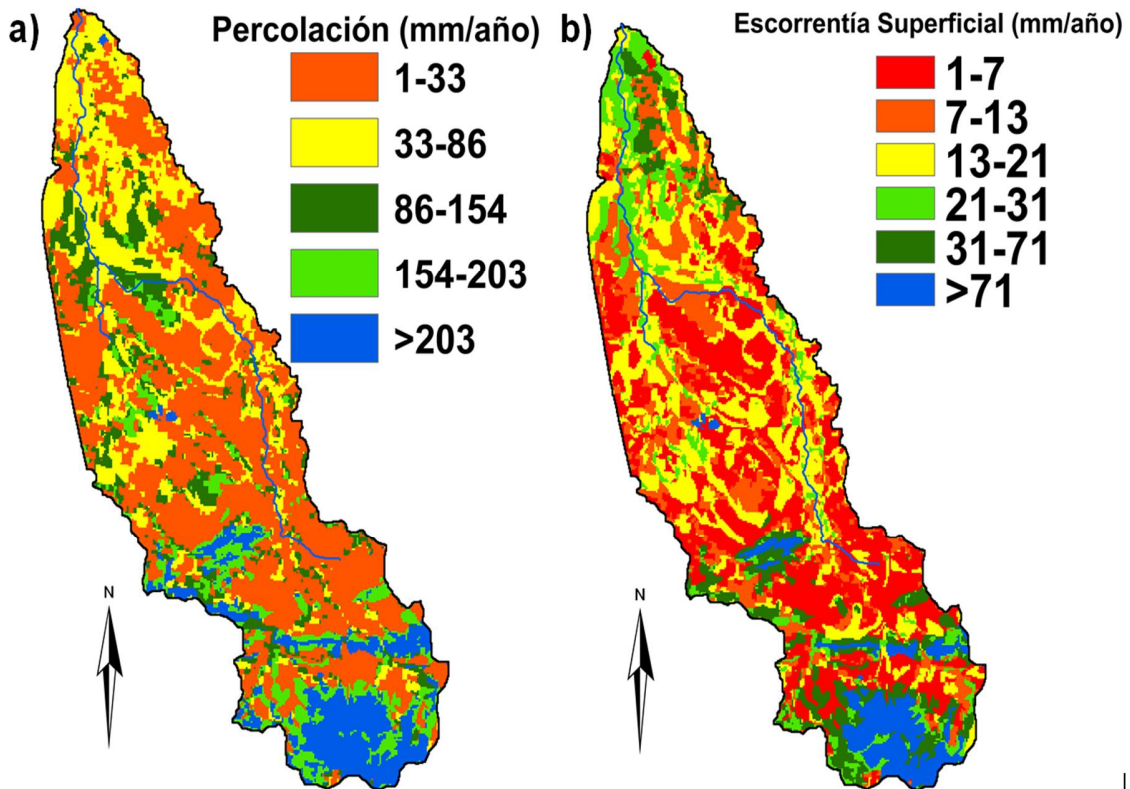


Figura 8 - Mapas de distribución espacial calculado por el modelo SWAT a) de recarga promedio anual en (mm/año), b) de escurrimiento superficial promedio anual en (mm/año).

4 CONCLUSIONES

El modelo SWAT ha dado resultados satisfactorios y es capaz de representar procesos hídricos en una cuenca de llanura. Se obtuvo una calibración y validación de datos aceptables, lo que indica que puede ser utilizado como una herramienta de gestión y de planificación en cuencas en zonas llanas y es posible utilizarlo para implementar diferentes escenarios posibles de uso de suelo, prácticas de manejo, entre otros.

Los modelos matemáticos semidistribuidos continuos como el SWAT son una herramienta matemática adecuada para analizar periodos de excesos y déficit hídricos, debido que analizan a largo plazo el impacto de los usos del suelo y sus rotaciones.

Una adecuada simulación del escurrimiento superficial dependerá en gran parte, de la corrección del modelo de elevación digital, ya que estos pueden producir distorsiones locales en las vías y en los bajos, por lo cual no permiten una adecuada definición de la dirección y cantidad del escurrimiento.

REFERENCIAS

- Allen R., Pereira L., Raes D., & Smith M., 1998. Evapotranspiración del cultivo - Directrices para las necesidades de agua de los cultivos de computación - FAO: Riego y Drenaje 56. ISBN 92-5-104219-5.
- Arnold J., Williams J., Srinivasan R, King K, & Griggs R., 1996. SWAT — Soil and Water Assessment Tool (User manual). Temple, TX: U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, Grassland Soil and Water Research Laboratory;
- Entraigas, I., 2008. Implementación de sistemas de soporte de decisiones multipropósito a escalas urbana y rural, tesis doctoral Universidad Nacional de la Plata, pp. 90-100.
- FAO,2009. CROPWAT 8.0 has been developed by Joss Swennenhuis for the Water Resources Development and Management Service of FAO.
- INDEC, 2010. Estimaciones de población total por departamento y año calendario Período 2001-2010 Instituto nacional de estadística y censos de Argentina, pp. 11.
- INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria), 1992. Carta de Suelos de la República Argentina. Hoja 3760-16-3 azul sur, Hoja 3760-22-1 base azupardo.
- Moriasi D.N., Arnold J., Liew V., Bingner R., Harmel R., &Veith T., 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, pp. 885-900.
- NASA, 2001. "SRTM, Shuttle Radar Topography Mission",<http://www.jpl.nasa.gov/srtm/>,
- Neitsh S., Arnold J., Kiniry J., & Williams J., 2005.Herramientas de evaluación de suelo y agua, documentación teórica. Texas AgriLife Research Center Blackland en Temple, Texas, pp. 20-100.
- Scioli Carlos, 2010. Modelación del escurrimiento superficial en áreas de llanura: implementación y calibración de un modelo distribuido de grilla. Tesis Maestría. Universidad Nacional de Rosario.
- Srinivasan, R., & Arnold J. G., 1994. Integration of a basin-scale water quality model with GIS. *Water Resour. Bull.* 30(3), pp.453-462.
- Van Griensven A, Meixner T, Grunwald S., Bishop T, Di Luzio M & Srinivasan R., 2006. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *J Hydrology* ;324(1-4), pp.10-23.
- Varni M., 2005. Evaluación de la recarga al acuífero del azul: valores medios y variaciones temporal y espacial. Tesis doctoral Universidad Nacional de Rosario Facultad de Ingeniería. pp 90-106.
- Zimmerman E. D., 1999. Adaptación de tecnologías existentes a los sistemas hidrológicos de llanura: modificación y aplicación de modelo de onda cinemática. Cuadernos del CURIHAM. ISSN 1514-2906, pp. 11-31.