

# Calibración del Modelo Hidrológico SWAT en la Cuenca del Río Salado, Provincia de Buenos Aires

*Laura Brandizi y Juan Carlos Labraga*

Centro Nacional Patagónico (CENPAT), CONICET.

E-mail: laurabrandizi@gmail.com

RESUMEN: El objetivo de este trabajo ha sido calibrar el Modelo de Simulación Hidrológica SWAT (Soil & Water Assessment Tool, Arnold et al. 1998), motivados por la creciente necesidad de crear un sistema de pronóstico de caudales para la Cuenca del Río Salado en Buenos Aires. La característica más notable de esta cuenca es la falta de relieve, gran parte del área está constituida por una llanura con pendiente suave (0.01%) lo que hace más complejo su modelado ya que el sistema de drenaje natural está pobremente desarrollado. La calibración se realizó en dos estaciones de aforo en donde se disponía de datos de caudales confiables. El coeficiente de correlación resultó mayor o igual a 0.80 con  $p < 0.01$  y el error estándar normalizado  $NSE > 0.50$  lo que indica un ajuste satisfactorio. El modelo representó adecuadamente los eventos extremos de inundaciones y sequía ocurridos en el período de estudio. Los resultados preliminares obtenidos en la calibración y validación de este modelo hidrológico muestran que podría ser aplicado provechosamente para realizar pronósticos de caudales y análisis de los cambios en el escurrimiento y en la calidad del agua de esta cuenca debidos a factores diversos, como variaciones en el régimen de precipitación, modificaciones en el uso de suelo y otras causas antropogénicas.

## INTRODUCCIÓN

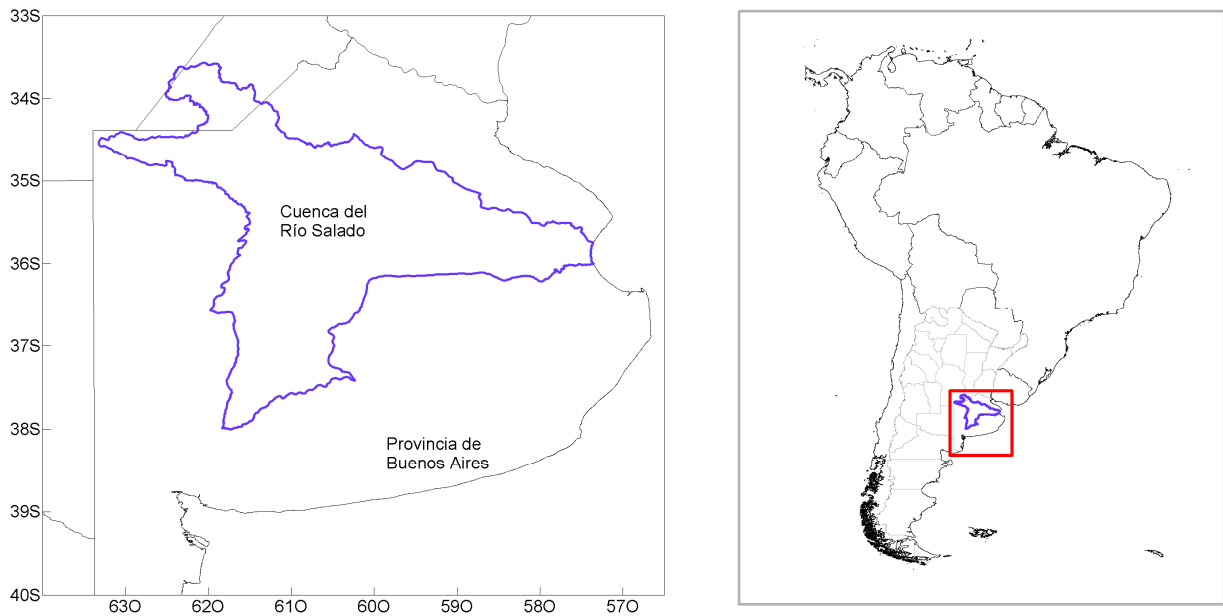
El estudio de la Cuenca del Río Salado ubicada en la Región Pampeana Argentina reviste especial interés por ser una región que concentra un gran porcentaje de la producción agrícola-ganadera del país. Abarca un área de 78166 km<sup>2</sup> y desemboca en la Bahía de San Borombón en la Provincia de Buenos Aires (Figura 1).

Su condición de Cuenca de Llanura constituye un escenario de suma fragilidad ante eventos hidrológicos extremos, tanto de déficit como de exceso hídrico. En este último caso, la escasa pendiente del relieve impide evacuar volúmenes importantes de agua acumulados en corto tiempo lo cual, junto a otros factores, conduce a la ocurrencia de vastos y persistentes anegamientos. Los eventos de inundación ocurridos en los años 1980 y 1985 tuvieron una duración de cinco a seis meses y afectaron gran parte del área de la cuenca, ocasionando grandes pérdidas materiales (Herzel et al., 2004). Las sequías persistentes que ocurren en la región degradan la calidad del suelo y tienen un impacto directo en la economía, la sociedad y el ambiente. Algunas de las causas conocidas de sequías en la Región Pampeana son anomalías persistentes en la circulación atmosférica que inhiben la entrada del vapor de agua a la región, así como una exacerbada subsidencia atmosférica asociada con condiciones anticiclónicas anormalmente intensas que restringen la convección (Labraga et al., 2002).

Los Modelos hidrológicos son herramientas ideales para el análisis y la evaluación del comportamiento de una Cuenca Hídrica. Los modelos de simulación continua permiten simular la escorrentía causada por lluvias con intervalos de días durante largos períodos de tiempo. Esto hace posible el análisis de los cambios en el escurrimiento y en la calidad del agua de una cuenca debidos a factores diversos, como variaciones en el régimen de precipitación de una región, modificaciones en el uso de suelo y otras causas de origen antrópico. Por lo tanto, el uso de estos modelos permite planificar las actividades de manejo del recurso agua y la toma de decisiones de un modo racional.

El objetivo de este trabajo ha sido calibrar el Modelo de Simulación Hidrológica SWAT (Soil & Water Assessment Tool, Arnold et al., 1998) en la Cuenca del Río Salado de Buenos Aires para su posterior utilización en el pronóstico de caudales.

En la siguiente sección se describen las características principales del modelo hidrológico, los datos de entrada utilizados en las simulaciones y las medidas estadísticas empleadas para su calibración y validación. En la sección Resultados se presentan las comparaciones de la simulación con los datos observados y los valores de los parámetros de calibración seleccionados; la última sección corresponde a las Conclusiones.



**Figura 1.** Localización de la Cuenca del Río Salado, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### *Características de la cuenca hídrica*

La característica más notable de la cuenca del Río Salado es la falta de relieve, gran parte del área está constituida por una llanura de pendiente suave (0.01%) ubicada por debajo de los 100 m snm. Los procesos eólicos han tenido una influencia considerable en la geomorfología del área, con evidencia en los sistemas de dunas y depresiones. Los accidentes naturales reflejan condiciones anteriores de mayor aridez, y no se ajustan al clima y al régimen de escorrentía existente en la actualidad. Básicamente, la mayoría de los ríos y arroyos no han desarrollado las propiedades geométricas de un sistema estable, ni en términos de sección transversal ni de perfiles longitudinales, lo cual complica fuertemente el drenaje de los excedentes hídricos. Entre las variables que caracterizan el clima de esta cuenca hídrica, la de mayor interés es sin duda la distribución espacial y variabilidad temporal de la lluvia en la región. La precipitación media anual para la cuenca es 870 mm (promedio 1911-1996), siendo en general mayor que el promedio en el norte y menor en el sur. Los análisis de series de tiempo mostraron que el periodo de menores precipitaciones ocurrió hacia finales de 1920. Desde entonces, ha habido un crecimiento continuo con un marcado aumento a principios de 1980 (Informe Final del Plan Maestro Integral de la Cuenca del Río Salado, 2000).

### *Características del Modelo SWAT*

El modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) fue diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Texas (Arnold et al., 1998). Es un

modelo de simulación continua que opera a paso de tiempo diario. Está físicamente basado y permite simular la producción de agua y sedimentos a escala de cuenca hídrica, así como el impacto que tienen las prácticas agronómicas en la calidad del agua, por el uso de pesticidas y fertilizantes.

Los componentes principales del modelo incluyen clima, hidrología, propiedades y temperatura del suelo, manejo de la tierra, crecimiento de cultivos, dinámica de nutrientes, pesticidas, bacterias y agentes patógenos.

El modelo divide la cuenca en subcuencas que a su vez son divididas en unidades de respuesta hidrológica (URH) basándose en la topografía, el tipo y el uso del suelo. Luego, encauza los flujos de agua a través de canales y reservorios hacia el punto de salida de la cuenca.

Se basa en una ecuación de balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca. Una descripción detallada de los fundamentos teóricos del modelo se puede encontrar en (Neitsch *et al.*, 2009).

La simulación de la hidrología de la cuenca se divide en dos fases: la Fase Terrestre del ciclo hidrológico, que controla la cantidad de agua, sedimentos y pesticidas transportados hacia el canal principal por cada subcuenca y la Fase de Enrutamiento del agua, que controla el movimiento del agua, sedimentos, etc. a través del canal principal hasta el sitio de descarga de la cuenca.

La ecuación de balance de agua del ciclo hidrológico es la siguiente:

$$SW_t = SW_0 + \sum_i (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (1)$$

Donde  $SW_t$  es el contenido final de agua en el suelo en el día  $t$ ;  $SW_0$  es el contenido inicial de agua en el suelo,  $t$  es el tiempo en días, la sumatoria se extiende sobre el total de días simulado,  $R_i$  es la precipitación diaria,  $Q_i$  la escorrentía diaria,  $ET_i$  la evapotranspiración diaria,  $P_i$  la percolación diaria y  $QR_i$  el flujo de retorno diario. Todas las variables están expresadas en milímetros.

La escorrentía se pronostica separadamente para cada subcuenca y se canaliza para obtener la escorrentía total de la cuenca.

Las variables climáticas de entrada que requiere SWAT son precipitación, temperatura máxima y mínima, radiación solar en la superficie, velocidad del viento y humedad relativa. Incluye un generador de clima (wgn) que permite producir valores diarios de las variables atmosféricas de entrada que se pueden utilizar para completar datos faltantes o para realizar simulaciones climáticas.

Se definen dos tipos de canales en cada subcuenca: el canal principal y los canales tributarios al canal principal. También se diferencian dos sistemas de acuíferos subterráneos: un acuífero superficial no confinado que aporta caudal de retorno al canal principal y al acuífero profundo y un acuífero profundo confinado que contribuye al flujo de retorno a corrientes fuera de la cuenca.

SWAT posee una interfase denominada MWSWAT (George y Leon, 2007) desarrollada para MapWindow GIS de código abierto (<http://www.mapwindow.com>), la cual simplifica apreciablemente su utilización.

### *Datos de entrada*

El modelo de elevación digital del terreno (DEM) se obtuvo de las imágenes disponibles en SRTM Project (SRTM, 2004) con resolución de tres segundos de arco y proyección geográfica datum WGS84 (Sistema Geodésico Mundial). Se utilizaron los mapas de Suelo elaborados por FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) (FAO/UNESCO, 2003). En esta base de datos son clasificados casi 5000 tipos de suelo con una resolución espacial de 10 kilómetros y se proporcionan algunas propiedades de suelo en dos capas: de 0 a 30cm y de 30 a 100cm de profundidad.

La base de datos de usos del suelo fue construida desde la base de datos USGS Global Land Cover Characterization (GLCC). Este mapa tiene una resolución espacial de 1 kilómetro y representaciones de 24 tipos de usos de suelo. La información mencionada anteriormente fue re proyectada al Sistema de Coordenadas que utiliza MWSWAT.

Los datos de precipitación y temperatura diarios se obtuvieron de la base de datos NCDC (National Climatic data Center en <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/mpp/freedata.html>).

Los datos de caudales para la calibración se obtuvieron del Informe Final del Plan Maestro Integral de la Cuenca del Río Salado (2000).

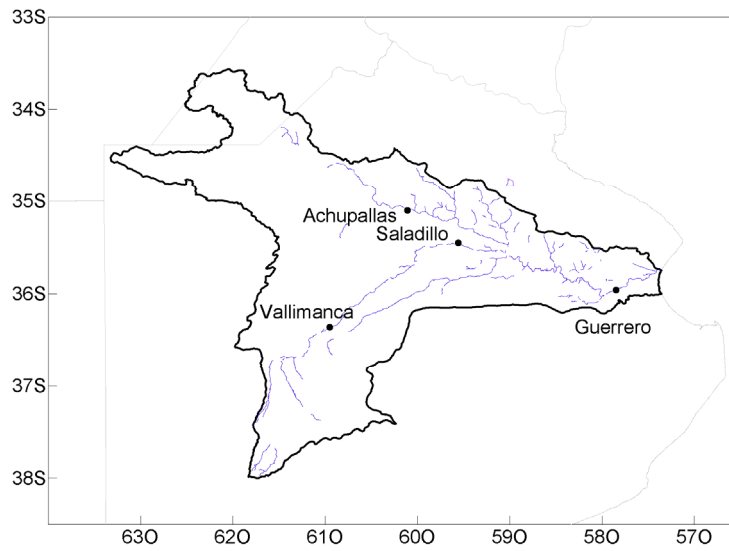
### *Modelado y calibración*

A partir de los datos de entrada enumerados en la sección anterior, SWAT define el área de las subcuencas y de las unidades de respuesta hidrológica URH. Además, mediante el generador de clima produce valores de precipitación y temperatura consistentes con los parámetros climáticos de la región para completar datos faltantes en las series de observaciones.

Las salidas se presentan como registros mensuales de caudal para cada subcuenca. Estos valores son comparados con los datos observados en las estaciones de aforo y mediante ajustes sucesivos de un conjunto de parámetros que definen las características físicas y la dinámica de la cuenca se procede a la calibración.

La simulación completa se realizó en el período 1972-2005. Para la calibración se utilizaron las estaciones que disponen de datos de caudales en un período continuo. El primer año de la simulación, 1972, no se utilizó en la comparación por tratarse de un período de estabilización de las condiciones del suelo.

Los puntos de aforo seleccionados para realizar la calibración y los períodos con registros disponibles son Achupallas (período 1992-1995), ubicado en el centro de la Provincia de Buenos Aires, y Vallimanca (período 1981-1986) que recibe los aportes del sector sudoeste de la cuenca. (Figura 2).



**Figura 2.** Ubicación de estaciones calibradas

Las medidas estadísticas utilizadas para determinar la capacidad de simulación de caudales en los diferentes puntos son el error estándar normalizado  $NSE$ , el sesgo relativo  $BIAS$  y el coeficiente de correlación  $R$ , definidos a continuación:

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{SIM} - Q_i^{OBS})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{OBS} - \bar{Q}_i^{OBS})^2} \right] \quad (2)$$

Donde  $Q$  indica caudal, los superíndices  $SIM$  y  $OBS$  indican valores simulados y observados respectivamente y la barra superior indica el valor medio en el período de estudio.

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{SIM} - Q_i^{OBS})}{\sum_{i=1}^n Q_i^{OBS}} \times 100 \quad (3)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{SIM} - \bar{Q}_i^{SIM}) * (Q_i^{OBS} - \bar{Q}_i^{OBS})}{\sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_{i=1}^n (Q_i^{SIM} - \bar{Q}_i^{SIM})^2 * \sum_{i=1}^n (Q_i^{OBS} - \bar{Q}_i^{OBS})^2}} \quad (4)$$

## RESULTADOS

Los valores de los estadísticos calculados para determinar la bondad de ajuste del modelo se muestran en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Caudales medios y valores de los estadísticos analizados

Estación	Período	Qobs (m3/seg)	Qsim (m3/seg)	BIAS	R	NSE
Achupallas	1992-1995	61.1	47.2	-12.6	0.80	0.65
Vallimanca	1981-1986	23.4	17.4	-24.7	0.86	0.59

Los valores de correlación  $R$  son significativos con una probabilidad  $p < 0.01$ , los valores de  $NSE$  en las dos estaciones son mayores al umbral de 0.50 y el sesgo relativo es inferior a 25%, esto implica que el modelo logra un ajuste satisfactorio en ambas estaciones. En la Tabla 2 se muestran los parámetros del modelo que fueron calibrados y los procesos hidrológicos que éstos controlan.

**Tabla 2.** Parámetros utilizados para calibrar el modelo SWAT.

Parámetro	Valor por Defecto	Valor de Calibración	Descripción
SURLAG	4	1	Coefficiente de retraso de la escorrentía superficial
ICN	0	1	Método de cálculo del Número de Curva Diario: 0=En función de la Humedad del Suelo; 1= En función de la Evapotranspiración de las plantas
CNCOEF	1	0.5	Coefficiente de ponderación utilizado en el cálculo del número de curva diario cuando depende de la evapotranspiración de las plantas
GWQMIN	0	5000	Nivel del umbral freático para que ocurra flujo de retorno
GW_REVAP	0.02	0.2	Coefficiente de revaporización del agua subterránea
*GWQMIN	0	200	
**CN2	varios	-4.50%	Número de Curva Inicial para la condición de Humedad II

\* Parámetros ajustados en las subcuencas aguas arriba de Achupallas.  
\*\* Parámetros ajustados en las subcuencas aguas arribas de Vallimanca.

SURLAG es el coeficiente de retardo del escurrimiento superficial que controla la fracción de lluvia neta que llegará al cauce en 24hs. En grandes cuencas con tiempo de concentración mayor a un día, solamente una porción de la escorrentía llega al canal principal en el día que es generada. Al disminuir este coeficiente, más agua se retiene en almacenamiento, reduciendo de este modo la magnitud de los picos de escorrentía a valores próximos a los observados.

ICN es el Método de Cálculo del Número de Curva diario. El número de curva se utiliza para calcular la escorrentía superficial en el método creado por el Servicio de Conservación de Suelos (Soil Conservation Service, 1972). Es una función de la permeabilidad del suelo, uso de la tierra y condiciones antecedentes de agua en el suelo. Se definen tres condiciones de humedad antecedente: I- seco, II- humedad promedio, y III – húmedo. Para ICN fue seleccionado el método en función de la evapotranspiración de las plantas, ya que lo hace menos dependiente del almacenaje de agua en el suelo y más dependiente del clima antecedente. En áreas de llanura se obtiene demasiada escorrentía al utilizar el método que contempla la humedad del suelo solamente.

CNCOEF es un coeficiente de ponderación utilizado para calcular el coeficiente de retención cuando el número de curva diario depende de la evapotranspiración de las plantas. Al disminuir el coeficiente se obtiene mayor retención de agua en la cuenca, esto es compatible con las características de regiones de baja pendiente natural.

GWQMIN es el nivel del umbral freático necesario para que el agua subterránea contribuya al cauce principal. El caudal base entra a la corriente si la cantidad de agua almacenada en el acuífero superficial excede el valor umbral especificado. El sistema de agua subterránea se encuentra muy localizado lo que da a lugar a que el flujo subterráneo horizontal sea muy limitado, como así también su aporte al flujo regional.

GWREVAP es el coeficiente de revaporización del agua subterránea. Si el valor se aproxima a cero, el movimiento del agua del acuífero superficial a la zona de raíz es restringida; si se aproxima a uno, la tasa de transferencia del acuífero superficial a la zona de raíz se aproxima al rango de evapotranspiración potencial. El rango de variación que permite SWAT es [0.02 y 0.20]. Debido al pequeño espesor de la zona no saturada, el nivel freático se encuentra directamente sujeto a la evapotranspiración, que ejerce un control significativo sobre los niveles de agua subterránea.

CN2 es el valor inicial del número de curva para la condición de humedad II que se utiliza para calcular la escorrentía superficial en el método creado por el Servicio de Conservación de Suelos. Está incluido en la base de datos del modelo hidrológico.

En la Figura 3 se muestran las series mensuales de caudal observado y simulado para las dos localidades calibradas. En Achupallas se observa que el modelo adelanta el pico de caudal del año 1993 y luego comienza a subestimar los valores de caudal hasta Septiembre de 1994; esto indicaría que en este período el caudal base modelado es bajo aunque las variables calibradas aguas arriba de la estación proponen el máximo aporte de agua subterránea. En cuanto a la sobreestimación de los picos, puede deberse a que el modelo estima una pendiente en base a datos de elevación MED que es mayor que la real, con lo cual se adelanta la respuesta de la subcuenca.

En la estación Vallimanca se observa que el modelo genera pequeños picos de caudal en el año 1982 y 1984 que en las observaciones no se encuentran. El pico del mes de Noviembre de 1985 se reproduce muy bien en tiempo y en magnitud. La simulación de picos de caudal no observados puede deberse a que la estación pluviométrica que provee los datos de lluvia correspondientes a la subcuenca con punto de aforo en Vallimanca no es representativa de la lluvia en la región. La subestimación del modelo de los caudales bajos puede deberse a las canalizaciones de numerosos cursos de agua realizadas en la región durante el siglo pasado, cuya ejecución ha modificado el escurrimiento de la cuenca.

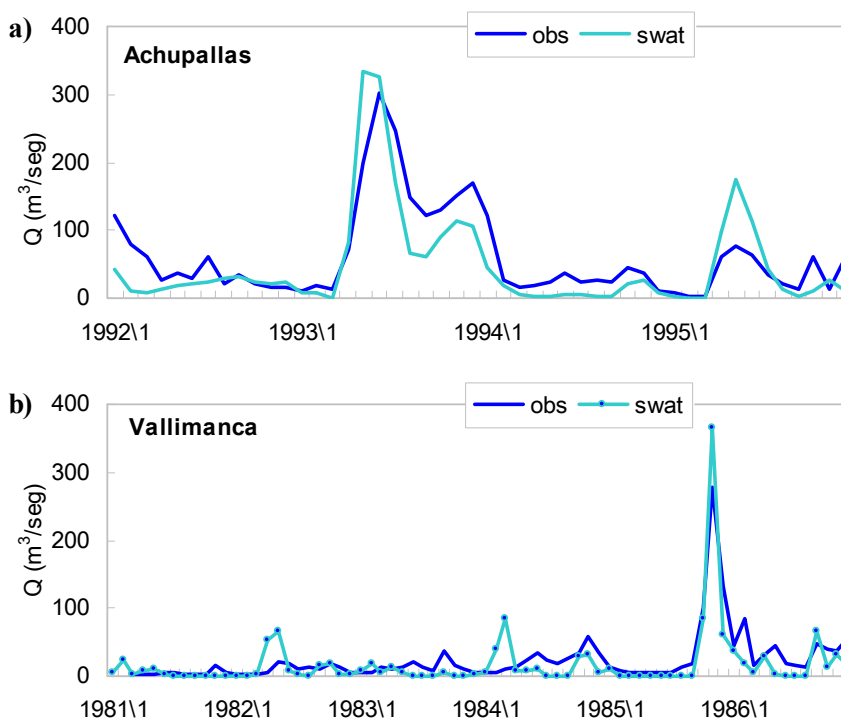
En cuanto al balance general de la cuenca, el modelo simula bien la relación precipitación-escorrentía indicando que menos del 10% de la precipitación se transforma en escorrentía.

Se han registrado importantes eventos de inundaciones en la cuenca desde el año 1978 (Herzel et al., 2004). En Abril de 1980 se produjeron desbordes de los ríos Salado, Vallimanca y Saladillo. Se registró una inundación mínima de 25 días y hasta 5.5 meses en algunas regiones. En el año 1984 se registraron inundaciones en Marzo y Abril. En el último bimestre de 1985 ocurrió una importante inundación en toda la cuenca que se prolongaron por 40 a 80 días. Entre Marzo y Mayo de 1987 se inundaron 22 partidos de la cuenca con una duración de entre 3 y 6 meses, alcanzando un máximo de 11 meses.

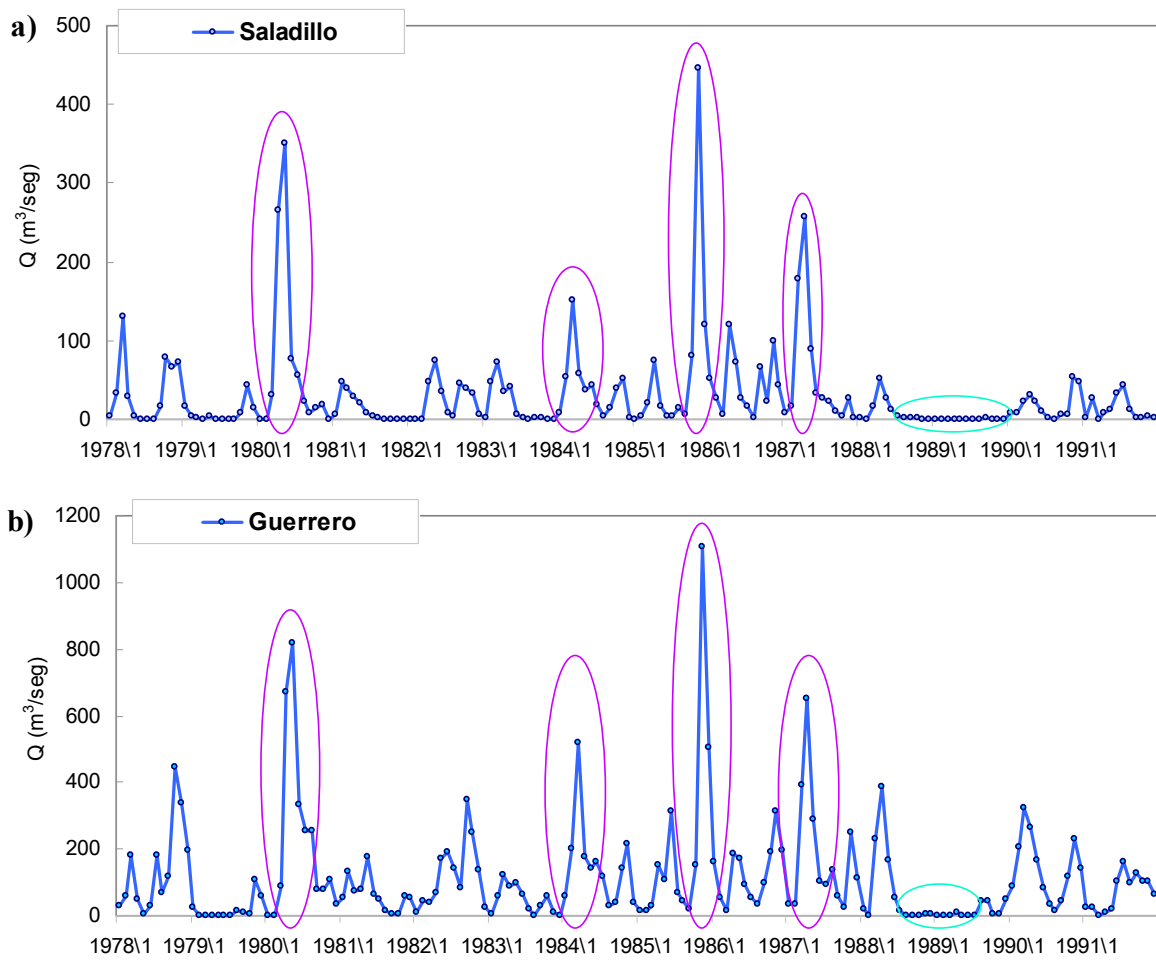


En cuanto a sequías, durante el año 1989 ocurrió una sequía generalizada en toda la provincia, como consecuencia de la escasez de lluvia del año anterior.

En la Figura 4 se muestra la respuesta del modelo ante eventos registrados de inundaciones y sequías en las estaciones Guerrero y Saladillo (Figura 2) en el período 1978-1991. Se observa que SWAT reproduce adecuadamente los eventos mencionados, estimando picos altos de caudal en los meses en dónde se produjeron las inundaciones y bajos caudales en el período de sequía. Esto es importante ya que por las características de la cuenca, como la falta de capacidad para evacuar los excedentes hídricos, se producen inundaciones generalizadas y de larga duración.



**Figura 3.** Series de caudal mensual observado y simulado en a) Achupallas b) Vallimanca



**Figura 4.** Series de caudal mensual simulado en a) Saladillo b) Guerrero.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se ha calibrado el modelo hídrico SWAT en dos estaciones de la cuenca del Río Salado. Las medidas estadísticas indican que la calibración es aceptable y el modelo resulta eficiente para su utilización en cuencas de llanura de gran extensión.

El análisis de las series de caudales simuladas por el modelo en las estaciones Saladillo y Guerrero reproducen caudales altos en años en donde se registraron inundaciones y caudales bajos en los años secos. Pese a la escasa información de datos de lluvia ingresados al modelo, éste reproduce adecuadamente la relación lluvia-escorrentía.

Es importante destacar dos aspectos de la calibración del modelo: 1) La delineación de la cuenca generada con MWSWAT presenta algunas diferencias con respecto al Atlas de la Secretaría de Recursos Hídricos de la República Argentina (Giraut *et al.*, 2010) que pueden atribuirse a los inconvenientes que presentan los modelos de elevación digital para representar con precisión la forma del terreno en áreas de llanura, 2) Es de suponer que una mayor disponibilidad de observaciones de lluvias y caudales distribuidos uniformemente en

la cuenca mejorarían tanto el proceso de calibración del modelo como la calidad del ajuste obtenido. Los resultados obtenidos sugieren que el modelo puede ser aplicado provechosamente para realizar pronóstico de caudales y análisis de posibles impactos debidos a cambios en el uso del suelo que puedan producirse en la cuenca del Río Salado.

*Agradecimientos.* Este trabajo fue realizado con fondos del Proyecto de Investigación PIP 11420100100093 provistos por CONICET.

## REFERENCIAS

- Arnold, J.G., R. Srinivasin, R.S. Muttiah, and J. R. Williams. 1998. Large Area Hydrologic Modeling and Assessment: Part I. Model Development. JAWRA 34(1):73-89.
- FAO/UNESCO, 2003. Digital Soil Map of the World and Derived Soil Properties. Rev.1. (CDRom). Available from [http://www.fao.org/catalog/what\\_new-e.htm](http://www.fao.org/catalog/what_new-e.htm)
- George, C. and Leon, L.F., 2007. Water Base: SWAT in an open source GIS. The Open Hydrology Journal, 2007, 1, 19-24.
- Giraut, M., Ludueña, S., Lupano, C., Valladares, A., 2010. Atlas digital de Cuencas y Regiones Hídricas Superficiales de la República Argentina-Versión 2010. Secretaría de Recursos Hídricos de la República Argentina. (CD Rom).
- Herzel, H., Caputo, M.G., Celis, A., 2004. Gestión de riesgos de desastre ENSO en América Latina. Informe Final IAI. Centro de estudios sociales y ambientales.
- Informe Final del Plan Maestro Integral de la Cuenca del Río Salado, 2000. Trabajo realizado por Sir William Halcrow & Partners Ltd. para el Ministerio de Economía, Unidad Ejecutora Provincial, Provincia de Buenos Aires, Argentina.
- Labraga JC, Sian B, Frumento O, 2002. Anomalies in the atmospheric circulation associated with the rainfall excess or deficit in the Pampa Region in Argentina, JGR - Atmospheres, 107, D23, 1-15,.
- Neitsch S., Arnold J., Kiniry J., Williams J., 2009. "Soil and Water assessment tool theoretical documentation", Agricultural Research Service and Agricultural Experiment Station, Temple, Texas.
- Reynolds, C.A., Jackson, T.J., Rawls W.J., 1999. Estimating available water content by linking the FAO soil map of the world with global soil profile database and pedo-transfer functions. Proceedings of the AGU 1999 spring conference. Boston, MA.
- Soil Conservation Service, National Engineering Handbook, section 4, Hydrology, U. S. Dept. of Agriculture, disponible en U. S. Government Printing Office, Washington, D. C., 1972.
- SRTM (2004), DEM data from International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), available form the CGIAR-CSI SRTM 90m. Database: <http://srtm.csi.cgiar.org>