

Validación del modelo SWAT en la cuenca del río Quequén Grande y evaluación de potenciales cambios a nivel de cuenca

María Victoria Feler¹, Gabriel Vazquez-Amabile^{2, 4}, Howard van Meer³, Fernanda. J. Gaspari⁴, Pablo. A. Mercuri¹, Daniel Prieto³, Eduardo Flamenco¹

¹ INTA – CIRN, Instituto de Clima y Agua- Los Reseros y Las Cabañas s/n (1712), Castelar, Buenos Aires.

² Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola (AACREA) – Unidad de Investigación y Desarrollo Sarmiento 1236 5to piso, Buenos Aires.

³ INTA – EEA Santiago del Estero, Jujuy 850 (4200), Santiago del Estero.

⁴ Universidad Nacional de La Plata, Escuela de Bosques. La Plata, Buenos Aires.

Mail de contacto: gvazquez@crea.org.ar

RESUMEN

El modelo SWAT ha sido recientemente validado para la cuenca del Río Quequén Grande (935.533 has) en el sudeste bonaerense. Dicho trabajo se realizó en el marco de un proyecto internacional enfocado en la evaluación en los cambios en la productividad del agua frente a futuros potenciales escenarios climáticos. SWAT fue seleccionado como modelo para trabajar a escala de cuenca por constituir una herramienta valiosa para estudiar el impacto de cambios climáticos de uso de tierras, como así también el impacto de cambios en prácticas de manejo y uso de fertilizantes y agroquímicos sobre la calidad y cantidad de fuentes de agua, en cuencas agrícolas. SWAT fue calibrado para escorrentía superficial para el periodo 1996-2000 y validado para el periodo 2001-2006. En la validación, el modelo presentó una eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0,37 y 0,61 para caudales diarios y mensuales respectivamente. El modelo fue exitoso al predecir un cambio significativo en los caudales que aumentaron de 16.6 m³/s, durante el periodo calibración, a 40 m³/s en el periodo de validación. En este trabajo se discuten el impacto de potenciales cambios en el uso de tierras y en las precipitaciones a nivel de cuenca, en base a simulaciones de escenarios posibles.

Palabras clave: SWAT – Quequén – Simulación – Escorrentía – Uso de tierras

ABSTRACT

The SWAT model has been recently validated for streamflow at Quequen Grande river watershed (935.533 has), as a part of an international bigger project focused on the evaluation of changes in water productivity against potential future scenarios of climate change. SWAT was chosen as watershed scale model since it constitutes a valuable tool to study the impact of potential climate and land use changes, as well as the impact of management practices and fertilizer and pesticide use on water sources, in agricultural watersheds. SWAT was calibrated for the period 1996-2000 and validated for 2001-2006. Model predictions for daily and monthly streamflow presented Nash Sutcliffe coefficients of 0,37 and 0,61 respectively, for the validation period. Daily predictions for this watershed were acceptable, since there was not a representative network of rain gages to cover the almost one million hectares of the watershed. The model also succeeds on predicting a significant change on average streamflow that increased from 16,6 m³/s in the calibration period to 40 m³/s in the validation period. In this paper, the hydrologic impact of potential changes in the land use change and precipitations are discussed, based on model simulations for plausible scenarios, at watershed level.

Keywords: SWAT, Quequén, Simulation, Runoff, Land use

1 INTRODUCCIÓN

La agricultura enfrenta el desafío de producir más alimentos, fibras y biocombustibles para satisfacer la demanda mundial creciente. Esto, a su vez, impone el desafío de realizarlo sustentablemente, reduciendo o manteniendo el volumen de agua utilizada y evitando su contaminación. Ambos desafíos deben enfrentarse en el marco de un proceso de Cambio Climático que agrega incertidumbre sobre la disponibilidad del recurso agua en el futuro.

En este contexto, es importante conocer la dinámica e interacción de las variables hidrológicas a nivel de cuenca. En este sentido, el uso de modelos hidrológicos matemáticos que cuantifican variables y procesos dentro de una cuenca, permiten estimar escenarios potenciales futuros, constituyendo una herramienta valiosa para la planificación y elaboración de estrategias productivas y de ordenamiento del territorio.

Numerosos trabajos demuestran la capacidad de distintos modelos hidrológicos para el análisis y la evaluación del comportamiento de una cuenca hídrica. En los últimos años, ha habido un desarrollo creciente y una mejora continua en el campo de la modelización hidrológica.

Entre los diversos modelos actualmente propuestos, el modelo hidrológico SWAT (Soil & Water Assessment Tool) (Arnold et al., 1998) constituye una herramienta de interés para el análisis y evaluación de diferentes impactos en la disponibilidad y dinámica del recurso hídrico en cuencas de llanura.

SWAT fue desarrollado conjuntamente entre el USDA y la Universidad de Texas A&M, para evaluar el uso y manejo de la tierra sobre la producción y calidad de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas. Es un modelo continuo, semi-empírico y de paso diario y subdivide a la cuenca en unidades de respuesta hidrológica (HRUs) según tipos de suelos, uso de la tierra y topografía (Neitsch et al. 2005). SWAT permite analizar alternativas de manejo y sus efectos sobre la hidrología y calidad del agua (White y Chaubey, 2005; Vazquez Amabile et al. 2006). Ha sido exitosamente empleado en simulaciones de largo plazo, de caudales, erosión y transporte de sedimentos y nutrientes en cuencas de diferente extensión y condiciones edáficas, de cobertura vegetal, climáticas y geológicas (Borah y Bera, 2004; Bekiarisi et al. 2005; Schuol y Abbaspour, 2006).

En los Estados Unidos, este modelo ha generado buenos resultados para la predicción de escorrentía en varias cuencas de estudio (Saleh et al. 2000 y Spruill et al. 2000) y en Argentina hay pocas experiencias en el uso de SWAT, siendo el trabajo de Kraemer et al. (2011), uno de las primeras validaciones en región pampeana, en el noreste de la Provincia de Buenos Aires. Por estas razones SWAT ha sido elegido para su validación en la cuenca de Río Quequén Grande.

La cuenca del Río Quequén Grande, se encuentra en el sudeste de la Provincia de Buenos Aires y tiene una extensión de 935.533 has, abarcando los partidos de Necochea, Lobería, Tandil, Azul, González Chávez, Benito Juárez y San Cayetano.

El Río Quequén Grande tiene 173 km de largo y la organización de su red es de tipo dendrítica formada por un importante número de afluentes, con dirección general Norte-Sur y desemboca en el Mar Argentino. Un 8% del área total de la cuenca se extiende sobre un paisaje serrano, sobre el sistema de Tandilla, con cotas entre 50 y 500 msnm, mientras que un paisaje de llanura abarca la mayor superficie de la cuenca (91%), interrumpido por un cordón medanoso, paralelo a la costa marítima. Según Kruse et al. (1997), la problemática hidráulica de la cuenca radica en los cambios abruptos que se registran en el paisaje desde la zona serrana, con elevadas alturas y marcadas pendientes, hacia la llanura, en la que las pendientes son inferiores al 0,3%

Climáticamente, se trata de un área subhúmeda-húmeda, con una distribución irregular de las precipitaciones durante el año. El invierno la estación menos lluviosa, y la precipitación anual media oscila entre los 1100 mm, con déficit hídricos estacionales.

Se trata de una zona mixta agrícola y ganadera en la que se realizan cultivos de soja, maíz, girasol, papa, entre otros, siendo particularmente importante el área destinada al cultivo de trigo y cebada.

La Cuenca del Río Quequén Grande posee un 5% de su superficie que presenta riesgo de erosión hídrica superficial alto (área serrana), donde se considera relevante la implementación de prácticas conservacionistas para evitar la pérdida de suelo. El 84 % de la cuenca expresa riesgo de erosión bajo, acompañada con una buena capacidad de infiltración de los suelos y la conveniente cobertura vegetal del suelo, tanto por los cultivos agrícolas en rotación y generalización de la siembra directa, en la región agrícola, y también pasturas permanentes (al oeste de la cuenca). El resto de la unidad hidrológica, presenta rasgos de erosión hídrica superficial moderada (Leonart et al. 2006).

El objetivo del presente estudio fue validar el modelo SWAT y estudiar su capacidad para su posterior implementación en el análisis de la respuesta hidrológica ante diferentes escenarios climáticos y de uso del suelo en la Cuenca del Río Quequén Grande

2 MATERIALES Y METODOS

La simulación de la hidrología de una cuenca con el modelo SWAT, 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 circulación del agua, que comprueba el movimiento del agua, sedimentos, a través del canal principal hasta el sitio de descarga de la cuenca. El balance de agua del ciclo hidrológico de ambas fases, se expresa con la ecuación 1.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad (1)$$

En 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, \sum_i es la sumatoria que 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.

El modelo requiere ciertos datos de entrada referida a la altimetría de la cuenca, el uso de las tierras, los suelos y registros diarios climáticos. Esta información fue organizada, almacenada y procesada con sistemas de información geográfica (SIG), generando la base de datos según la estructura del modelo SWAT.

En relación a la caracterización topográfica de la cuenca, se utilizó el modelo de elevación digital del terreno (DEM) obtenido de las imágenes disponibles en SRTM (Project Shuttle Radar Topography Mission NASA versión 2 - 90m del GeoPortal CGIAR -CSI (Consortium for Spatial Information) (SRTM, 2004).

Con respecto a los suelos, se empleó la base de datos cartográfica, con perfiles modales para las distintas unidades edáficas del Atlas de la República Argentina de INTA (1:500.000).

El mapa de Uso de Tierras se basó en una clasificación no supervisada de la campaña agrícola 2003/2004 a partir de imágenes del Sensor TM del Satélite Landsat 5, que fue contrastada con las estadísticas publicadas por RIAN (*Red de Información Agropecuaria Nacional* de INTA: <http://rian.inta.gov.ar/>).

Según dichas estadísticas, la cuenca presenta un 73% del área con pasturas y pastizales. La superficie agrícola promedio de la cuenca para el periodo 1996-2006 fue de 198.000 has variando entre 185.000 has (1995/1996) y 215.000 has (2003/2004). En ambas fuentes, la superficie promedio de cultivos de invierno (Trigo y Cebada) representaron aproximadamente el 50% del área agrícola y el 50% restante correspondió a los cultivos de verano (maíz, soja y girasol). Las pasturas y pastizales ocuparon alrededor del 70% del área total de la cuenca. De este modo, el uso de tierras agrícolas correspondió al área clasificada con imágenes, y los cultivos se asignaron en la proporción informada por RIAN: Pasturas y Pastizales 73%, Trigo y Cebada 14%, Maíz 2%, Soja 3% y Girasol 8%.

Las variables climáticas requeridas para la modelización con SWAT son la precipitación, la temperatura del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. En este aspecto se utilizaron los registros correspondientes a las estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico

Nacional y de INTA de las localidades de Balcarce, Tandil y Benito Juárez. Asimismo, se calcularon los parámetros mensuales requeridos por el modelo para el simulador climático.

Luego de compilar la información básica requerida por SWAT, se procedió la calibración y validación, utilizando el caudal a la salida de la cuenca, como variable de comparación. Los datos de caudales obtenidos mediante la simulación, se compararon con los datos medidos de caudal de la estación La Cascada calculados a partir de alturas del agua proporcionados por la Autoridad del Agua (ADA) de la Provincia de Buenos Aires y el cálculo teórico de relación Altura/Caudal a partir de la medición de la sección. Se contó con registros diarios desde Julio de 1963 hasta Agosto del 2006. Se utilizaron para la calibración y validación, los registros del periodo 1990-2000 y 2000-2006. Los caudales mensuales medidos para el periodo 1996 -2000 alcanzaron un valor medio de 16,5 m³/s y un desvío de 20,4 m³/s. Para el periodo 2001-2006, hubo un rango de datos faltantes entre Mayo del 2003 y Diciembre 2004. Se aplicó el coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe para analizar los resultados alcanzados.

Los escenarios climáticos hipotéticos futuros de cambio climático se modelaron con la aplicación del programa LARS-WG (Semenov and Stratonovitch, 2010), que trabaja con un generador de tiempo estocástico para el análisis de escenarios. A partir de información meteorológica medida (temperatura mínima y máxima y precipitación) se generaron 999 años de datos. Posteriormente, se ordenaron en forma decreciente según la precipitación total acumulada de los meses de diciembre, enero y febrero (DEF) para cada año y se dividieron en tres grupos de 333 años cada uno, denominándose grupo años húmedos, normales y secos, cada uno.

Los escenarios climáticos hipotéticos futuros se generaron muestreando al azar series de 100 años, estableciendo:

- a. un escenario futuro “Húmedo” se compuso en un 60% del “grupo años húmedos”, un 30% del “grupo años normales” y un 10% del “grupo años secos”;
- b. un escenario futuro “Normal” contó con un 33% de aporte de cada grupo,
- c. un escenario futuro “Seco” se compuso en un 10% del “grupo años húmedos”, un 30% del “grupo años normales” y un 60% del “grupo años secos”.

Mediante el uso del paquete informático R (<http://cran.r-project.org/manuals.html>), se procesaron los datos para realizar la nueva simulación con el modelo SWAT con los parámetros calibrados y validados anteriormente.

3 RESULTADOS

3.1 Calibración y Validación del Modelo SWAT

El modelo fue calibrado y validado en base a la comparación de los caudales observados a la salida de la cuenca con los valores predichos por el modelo. Para el periodo de calibración se separaron los registros de caudales del año 1996 al 2000, y para el periodo de validación de los caudales del 2001 al 2006. En el periodo de validación hubo algunos registros ausentes en los años 2003 y 2004.

En el proceso de calibración se comenzó por ajustar la evapotranspiración real y seguidamente se ajustó el escurrimiento superficial reduciendo el número de Curva para todas las HRUs y otros parámetros del modelo, para ajustar el caudal pico en cada evento de precipitación. Luego se adecuaron los parámetros relacionados al flujo subsuperficial para ajustar el caudal o flujo base. La fecha de inicio de la corrida fue 1990, para analizar el periodo 1996-2000 y mejorar los resultados de flujo base inicial del periodo de calibración (Periodo de “Warm-Up” de 6 años), y de esta manera estabilizar el almacenaje y flujo sub-superficial en toda la cuenca.

La calibración se realizó en forma “Manual” en un proceso iterativo de a un parámetro por vez. Se hizo un primer ajuste en base al caudal mensual medio y luego se pasó a trabajar con los valores diarios. No se utilizó el método de “Autocalibración” por consumir mucho más tiempo debido de cómputo y no necesariamente más preciso. En el proceso de calibración se ajustaron varios

parámetros tales como el número de curva, la capacidad de almacenaje del suelo, y otros parámetros que gobiernan las ecuaciones de flujo sub-superficial.

En el proceso de evapotranspiración, se ajustó ESCO =0 para todas las HRUs. El ajuste general del escurrimiento se realizó reduciendo el número de curva (CN2) en un 15% para toda la cuenca y se ajustó la profundidad de suelos (Sol_Z) a 2000 mm para los suelos no someros. La máxima interceptación de lluvias por parte de la vegetación (CN Max) se ajustó a 10 mm. El pico de la descarga de caudales diarios fue calibrado ajustando los siguientes valores: SURLAG = 0.4; CH_N2=0.05; CH_K2=1 mm/hr y Alpha Bf= 0.0015. -

Los parámetros calibrados para ajustar el Flujo base fueron: Rchrg_Dp=0.05; GwSpcf_Yld=0.05; OV_N= 0.6 para "Range" y 0,4 para "AGRR"; SolAWC fue multiplicado por 1.10 para todos los suelos; Gw_Delay=0 days; GWQMIN=100; REVAPMIN=0 y GW_REVAP=0.12

Una vez finalizada la calibración, se corrió el modelo para el periodo completo desde 1996 al 2006, cuyos resultados se presentan en la Tabla 1, para los caudales (Q) mensuales, y en las tablas 3 y 4 para los caudales diarios y medio anual, respectivamente.

Los caudales mensuales fueron, en promedio, satisfactoriamente predichos por el modelo. El coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (R^2_{Nash}) fue de 0,75 en calibración y 0,61 en validación, siendo RMS de 14,17 y 33,31, respectivamente. El coeficiente de correlación R de Pearson fue 0,72 en calibración y 0,80 en validación, indicando que el modelo predijo bien la tendencia mensual, es decir los aumentos y disminuciones de caudal a lo largo del tiempo, como puede observarse en gráfico de la Fig.2 que abarca la serie de tiempo de caudales para la calibración y validación.

Tabla 1 - Resultados de la Calibración y Validación por Caudales Mensuales.

	Calibración (1996-2000)	Validación (2001-2006)
Q Medio Observado(m ³ /s)	16,54	36,01
Q Medio SWAT (m ³ /s)	16,70	36,58
R^2_{Nash}	0,75	0,61
R Pearson (Correlación)	0,72	0,80

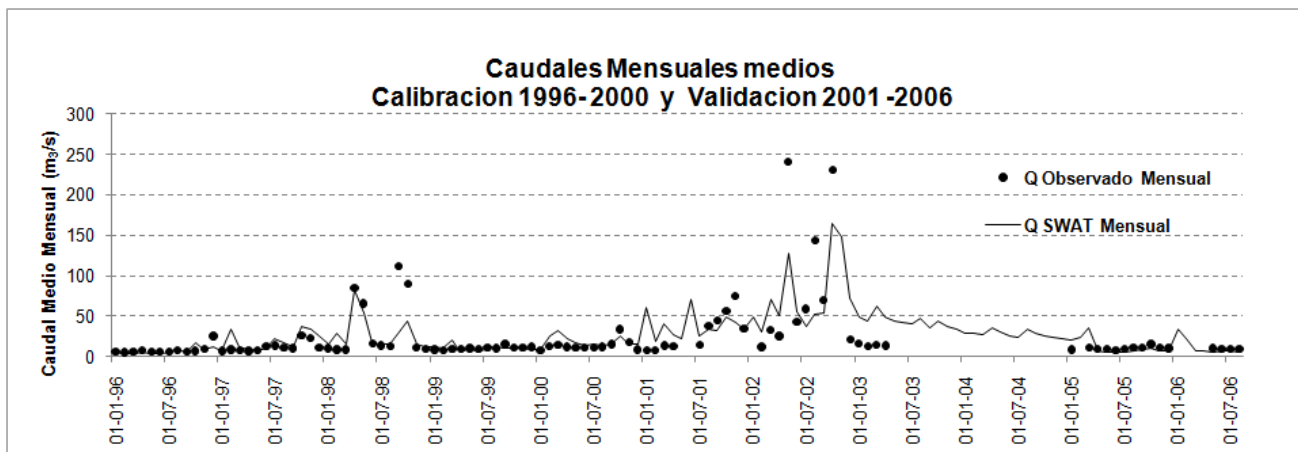


Figura 2 - Caudales Mensuales Periodo de Calibración y Validación (1996-2006).

En cuanto a las predicciones diarias del modelo fueron menos precisas que las mensuales (Tabla 3). A escala diaria es muy importante contar con registros representativos de lluvias. El coeficiente de Nash-Sutcliffe (R^2_{Nash}) fue de 0,21 en calibración y 0,37 en validación, el coeficiente de correlación R de Pearson fue 0,48 en calibración y 0,64 en validación. La Fig.3 presenta las series diarias de caudales observados y predichos por SWAT para los periodos de Calibración y Validación.

En cuanto a la comparación de caudales medio anual, observado y predicho por SWAT, hubo muy buen ajuste, pero los valores analizados fueron poco representativos, debido a que la serie de años fue tan solo de 10 años, incluso con registros incompletos en los años 2003 y 2004 (Tabla 4). Los valores anuales fueron muy bien predichos por el modelo en el periodo de validación y fue

exitoso al predecir incrementos significativos en los caudales durante el periodo de validación, pasando de 16 m³/s en calibración a 40 m³/s en periodo 2001-2006 de validación.

Tabla 2 - Resultados de la Calibración y Validación – Caudales Diarios

	Calibración (1996-2000)	Validación (2001-2006)
Q Medio Observado(m ³ /s)	16.57	40.42
Q Medio SWAT (m ³ /s)	16.67	37.11

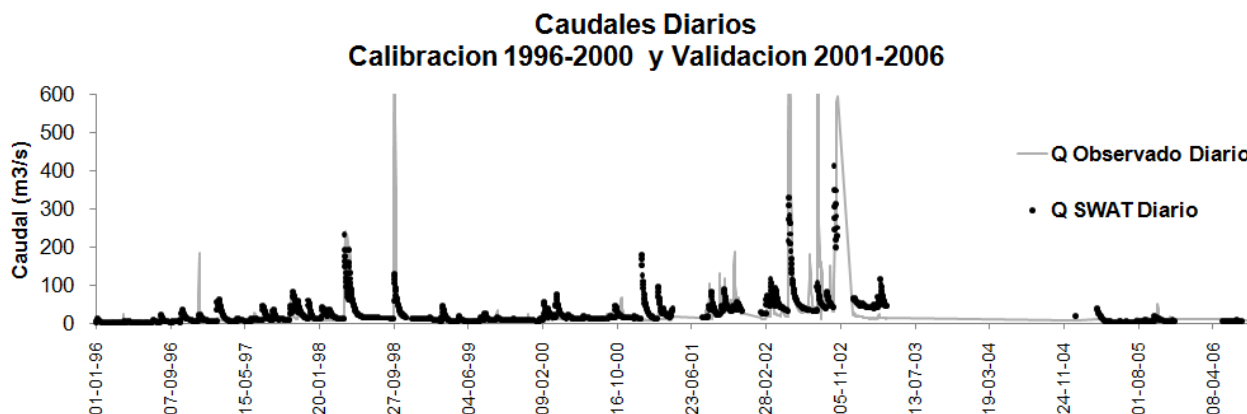


Figura 3 - Caudales Diarios de los periodos de Calibración (1996-2000) y de Validación (2001-2006)

Tabla 3 - Valores Anuales de caudal medio (m³/s) Observado y predicho por SWAT (1996-2006)

Año	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Q Observado	8,43	12,38	38,55	10,66	13,96	33,07	92,46			10,90	9,99
SWAT	6,82	18,96	28,73	10,58	18,26	38,41	76,48	43,92	27,79	11,67	9,82

A partir de estos resultados, se concluye que para estudios de largo plazo, el modelo SWAT resulta una herramienta de interés que permite analizar la variación interanual y a escala mensual con cierto grado de certidumbre. En este sentido, se prosiguió a utilizar el modelo para estimar escenarios de cambio climático y de cambios de uso de tierra en la misma cuenca del Río Ququén Grande.

3.2 Simulación Hidrológica para tres escenarios Climáticos

Los escenarios planteados proyectaron valores de precipitación anual promedio de 1001 mm, 921 mm y 891 mm para “Húmedo”, “Normal” y “Seco”, respectivamente. En términos de lluvias anuales presentan una tendencia normal para escenarios climáticos de 100 años (Fig.4).

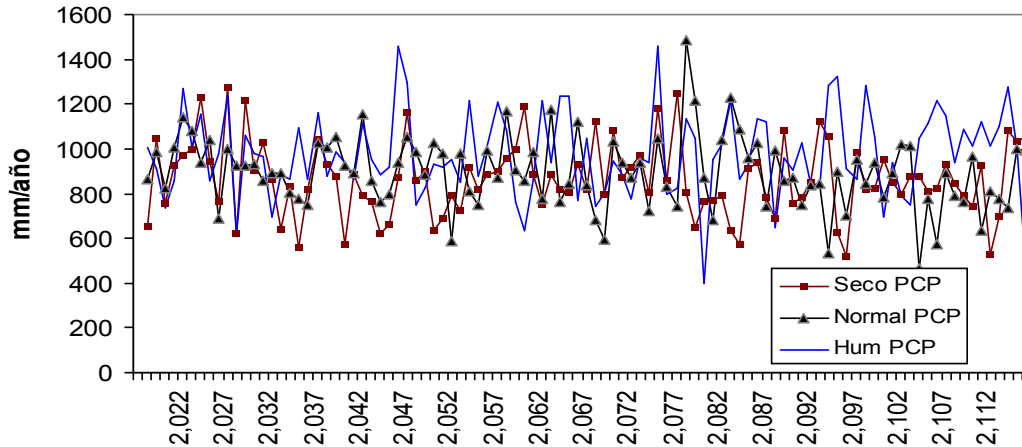


Figura 4. Precipitación anual de la Serie de 100 años, correspondientes a los escenarios climáticos propuestos.

La Tabla 5 presenta los valores mensual y estacional de los tres escenarios. Las mayores diferencias se visualizan en los meses de verano (trimestre de Diciembre, Enero y Febrero).

Tabla 4 - Precipitación Promedio Estacional de los escenarios climáticos (Período 2019-2016).

Precipitación Promedio (mm)			
Estación	Escenario		
	Húmedo	Normal	Seco
Otoño	255.6	251.2	247.4
Invierno	145.3	138.1	150.2
Primavera	247.3	239.6	245.3
Verano	353.3	292.1	247.6

Luego de generar proyectos independientes para cada escenario, se configuró el modelo SWAT con los valores ajustados en la calibración y se corrieron simulaciones para un período de 100 años en cada escenario. Los resultados alcanzados de caudal (Q) a la salida de la cuenca del Río Quequén Grande, se presentan en la Fig.5 para los escenarios propuestos, con la tabla correspondiente al valor mensual promedio.

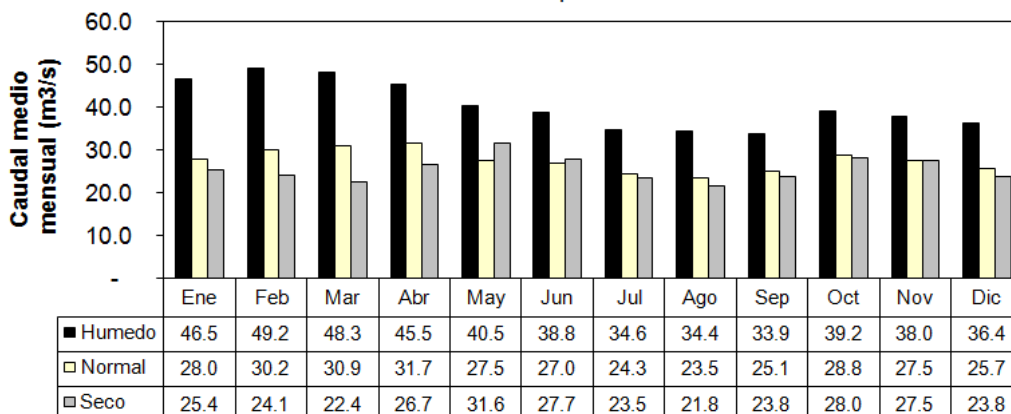


Figura 5 - Caudales medios anuales (m^3/s) estimado con SWAT para los tres escenarios climáticos y el uso actual de tierras de la cuenca.

Analizando el Q de los 3 escenarios planteados (Fig.5), el caudal medio anual predicho fue contrastante para el escenario húmedo, pero no hubo grandes diferencias entre los escenarios "Seco" y "Normal". Si se considera el escenario normal como línea de base, con un Q medio anual de $27,5 m^3/s$, el escenario húmedo se diferenció con un Q anual medio de $40,4 m^3/s$, mientras el Q medio fue de $25,5 m^3/s$ para el escenario seco, mostrando diferencias principalmente entre los meses de Enero y Abril.

Los resultados obtenidos permiten dimensionar la utilidad de los modelos hidrológicos para la estimación de cambios a nivel de cuenca. Sin embargo, exponen la necesidad de continuar el análisis de la calibración para lograr un mayor nivel de confiabilidad en las predicciones de los escenarios que se planteen a esta escala. En la Tabla 6 se detallan los resultados promedio anual de los escenarios generados por el modelo, expresados en lámina de agua (mm) para los factores que definen el ciclo hidrológico en la Cuenca del Río Quequén Grande.

Tabla 6 - Valores medios anuales estimados para los tres escenarios climáticos por el SWAT.

ESCENARIO	HUMEDO	NORMAL	SECO
	(mm /año)		
Precipitación	937,5	870,9	824,3
ET Potencial	881,5	883,9	884
ET real	641,9	648,1	611,9
Escurrimiento Total	195,62	137,01	127,57
Escurrimiento Superficial	63,18	41,25	40,53
Escurrimiento Subsuperficial	133,54	95,81	88,01
Recarga a acuíferos más profundos	11,75	9,16	8,74
Almacenaje en Suelo	88,23	76,63	76,09

3.3 Simulación Hidrológica del impacto del cambio de uso de tierras

El modelo SWAT permitió también analizar el impacto de cambios futuros en el uso de tierras en las distintas subcuencas de la cuenca del Río Quequén Grande. El estudio aquí presentado no está completo aun en este aspecto y se está trabajando sobre escenarios posibles para la cuantificación de la expansión agrícola en las tierras de la cuenca.

A modo de ejemplo, en forma simplificada, se seleccionó la subcuenca, denominada #1 (49.000 has), en la que actualmente se destina un 45% de la superficie a cultivos agrícola y 55% a pasturas y pastos naturales. En la misma se corrió el modelo SWAT para el período 1996-2006 a fin de comparar el impacto que ha tenido la agriculturización sobre el escurrimiento total, respecto a una situación hipotética inicial del pastizal como única cobertura en el 100% de la misma.

La Fig.6, muestra los resultados de la simulación de la descarga a la salida de la subcuenca #1, comparando el uso actual con la situación original de la cuenca con vegetación de pastizal.

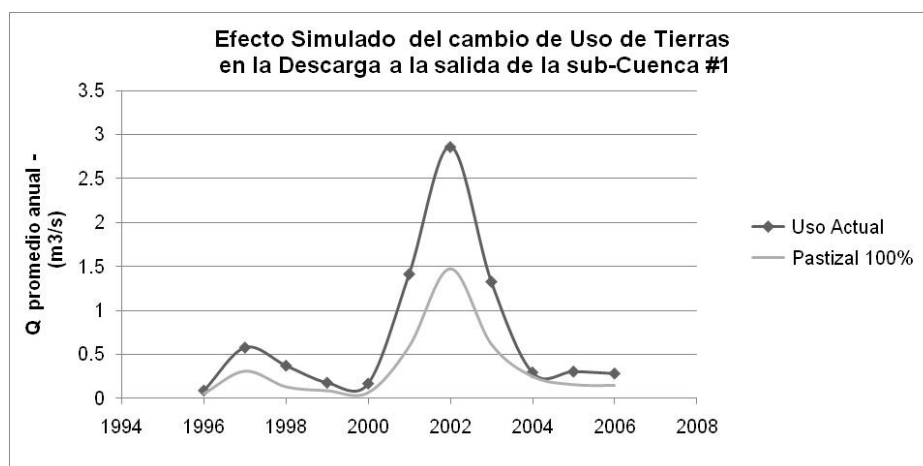


Figura 6 - Simulación del efecto del escurrimiento de la subcuenca #1, respecto de la situación con vegetación de pastizal natural en relación al uso actual con 45% de uso agrícola.

La descarga promedio anual de la subcuenca para el período 1996-2006 fue de 0.35 m³/s con vegetación de pastizal y 0.71 m³/s con el uso actual. El área bajo ambas curvas representa el volumen de agua de escurrimiento anual en los dos escenarios de uso de tierras.

El modelo permitió analizar los cambios del escurrimiento superficial y subsuperficial, expresado en lámina (Fig.7), lo cual permite analizar estrategias de implementación de buenas prácticas para

mejorar la infiltración en las tierras agrícolas a fin de asemejarse a la situación original. Por otra parte, al tratarse de un modelo espacial, permite analizar los sectores de mayor y menor escurrimiento identificando las áreas de mayor susceptibilidad. A modo de ejemplo, la Fig.8 muestra el mapa de escurrimientos promedio anual expresado en lámina, para todas las unidad de respuesta hidrológica (HRUs).

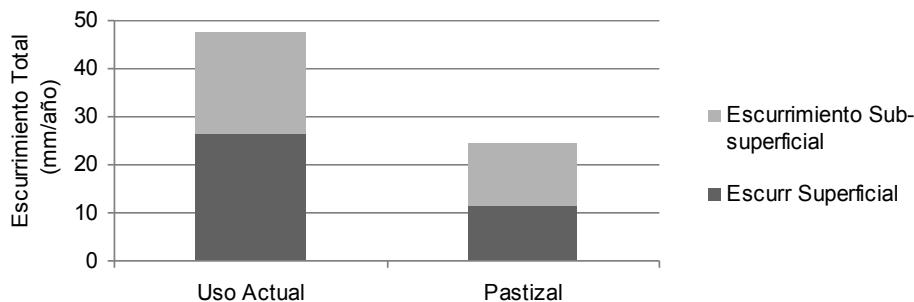


Figura 7 - Composición del escurrimiento total de las tierras de la subcuenca #1 simulado por SWAT según el uso actual y la situación de cobertura con pastizal natural.

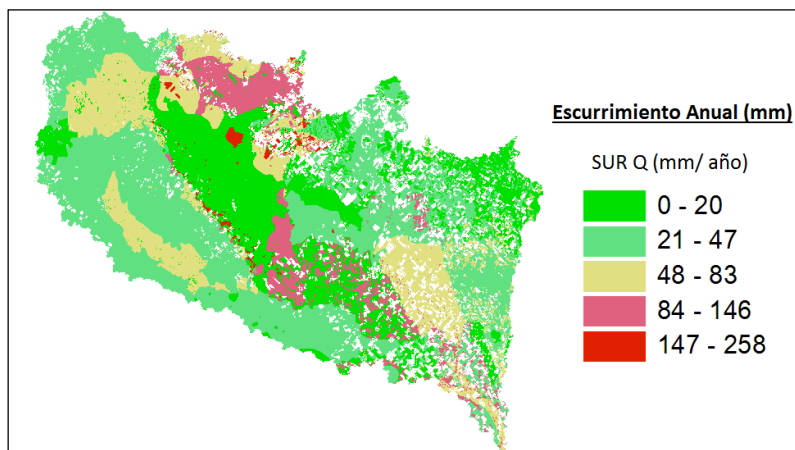


Figura 8 - Escurrimiento anual promedio expresado en lámina (mm/año) por HRU de la cuenca para el periodo 1996-2006

4 CONCLUSIONES

El modelo SWAT permitió modelizar la hidrología de la cuenca del Río Quequén Grande. En la validación para escorrentía superficial, el modelo presentó una eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0,37 y 0,61 para caudales diarios y mensuales respectivamente. El modelo fue exitoso al predecir un cambio significativo en los caudales que aumentaron de 16.6 m³/s, durante el periodo calibración, a 40 m³/s en el periodo de validación.

Al tratarse de un modelo continuo desarrollado para cuencas agrícolas de llanura, SWAT permitió estimar la respuesta hidrológica (infiltración y escurrimiento), ante posibles cambios en el uso de tierras, al pasar de pasturas a uso agrícola, y estimar el impacto de tres escenarios de precipitación sobre el escurrimiento de la cuenca.

Por tratarse también de un modelo distribuido y con interface GIS, fue posible analizar el fenómeno de escorrentía y su distribución espacial. El análisis de variables de salida como “mapas temáticos” permite identificar áreas susceptibles, a la hora de priorizar recursos en programas de control de escurrimientos y ante escenarios potenciales climáticos y uso de tierras.

En este sentido, SWAT resultó ser una herramienta muy valiosa para estimar cambios en la Cuenca del Río Quequén Grande y su ordenamiento hidrológico, y su potencial uso en otras cuencas de llanura del país. Los resultados presentados se complementan con trabajos anteriores

de modelización de la escorrentía superficial de la cuenca del Río Quequén grande (Rodríguez Vagaría et al., 2008).

REFERENCIAS

- Arnold, J.G.; R. Srinivasan; R.S. Muttiah; P. M. Allen. 1998. Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. *J. Am. Water. Resour. As.* 34: 73-89.
- Bekiarisi, I.G; N. Panagopoulos; M.A. Mimikou. 2005. Application of the Swat (Soil And Water Assessment Tool) model in The Ronnea catchment of Sweden. *Global Nest J.* 7: 252-257.
- Borah, D.K.; M. Bera. 2004. Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: review of applications. *Trans. ASAE.* 47: 789-803.
- Kraemer, F.B.; C.I. Chagas; G. Vázquez Amábile; E.A. Palacín; O. J. Santanatoglia; M. G. Castiglioni; M. J. Massobrio, 2011- Aplicación del Modelo hidrológico - SWAT- en una microcuenca Agrícola de la Pampa Ondulada. *Revista Ciencia del Suelo, Volumen 29 N.1*
- Kruse, E.; Laurencena, P.; Deluchi, M. y L.Varela. 1997. Caracterización de la red de drenaje para la evaluación hidrológica en la región interserrana (Provincia de Buenos Aires). En: *Actas del I Congreso Nacional de Hidrogeología y III Seminario Hispano- Argentino sobre temas actuales de hidrología subterránea.* Bahía Blanca, 133-145.
- Leonart, M.G.; Salomón, C.; Domínguez Daguer, D.; Gaspari, F.J. 2006 b. Zonificación de erosión hídrica superficial aplicando un SIG. Río Quequen Grande, P.B.A. *XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo y 1º Reunión de Suelos de la Región Andina Salta - Jujuy, Argentina.*
- Neitsch, S.L.; J.G. Arnold; J.R. Kiniry; J.R. Williams. 2005. Soil and Water Assessment Tool. Theoretical Documentation. *Grassland, Soil and Water Research Laboratory.* Agricultural Research Service, Temple, EUA. 475 p. Disponible en: <http://www.brc.tamus.edu/SWAT/downloads/doc/SWAT2005/SWAT%202005%20theory%20final.pdf> .
- Rodríguez Vagaría, A.; Gaspari, F.J.; Senisterra, G.E.; Delgado, M.I. y I.Ohde Cornely. 2008. Aplicación del modelo hidrológico Lthia para zonificación de la lámina de escorrentía en la cuenca del Río Quequén Grande. *Cuarto Congreso de la Ciencia Cartografía y XI Semana Nacional de Cartografía.* Bs As. Argentina
- Saleh A., J. G. Arnold, P. W. Gassman, L. M. Hauck, W. D. Rosenthal, J. R. Williams, and A. M. S. McFarland. 2000. Application of SWAT for the upper North Bosque River watershed. *Trans. ASAE* 43(5): 1077-1087.
- Semenov MA, Stratonovitch P(2010) The use of multi-model ensembles from global climate models for impact assessments of climate change. *Climate Research* 41:1-14
- Schuol, J.; K.C. Abbaspour. 2006. Calibration and uncertainty issues of a hydrological model (SWAT) applied to West Africa. *Adv. Geosci.* 9: 137-143.
- Spruill, C. A., S. R. Workman, and J. L. Taraba. 2000. Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model. *Trans. ASAE* 43(6): 1431-1439.
- SRTM. 2004. DEM data from International Centre for Tropical Agriculture (CIAT). Available from the CGIAR-CSI SRTM 90m. Database: <http://srtm.csi.cgiar.org>
- Vazquez Amábile, G., B. A. Engel and D. Flanagan. 2006. Risk Analysis for NPS pollution caused by Atrazine using SWAT in St Joseph River Watershed, IN. *Transaction of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineering)* Vol. 49(3): 667-678 .
- White, K.L.; I. Chaubey. 2005. Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable SWAT model. *J. Am. Water. Resour. As.* 41:1077-1089.