

Organización
de las Naciones Unidas
para la Educación,
la Ciencia y la CulturaPrograma
Hidrológico
Internacional

Calibración del modelo hidrológico SWAT para una cuenca de la región serrana de Córdoba (Argentina)

Calibration of the SWAT hydrological model for a basin in the mountain region of Córdoba (Argentina)

Juan F. Weber ^{1*}, Santiago Baigorri Ocampo ¹

Recibido: 23/07/2018

Aceptado: 23/04/2019

*Autor de correspondencia



Resumen

En el marco de un proyecto de investigación cuyo objetivo es cuantificar, a través del modelado hidrológico, el impacto hidrológico a largo plazo de los incendios forestales en cuencas de la región serrana de la provincia de Córdoba (Argentina) se presentan los resultados preliminares de la simulación continua de una cuenca representativa de la región con el ampliamente difundido modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). La cuenca seleccionada, la del río grande en Ume Pay (tributario del río Tercero) cuenta con el registro simultáneo de precipitaciones y caudales diarios más extenso de la provincia, lo que la hace el mejor caso de estudio para la aplicación y calibración de un modelo hidrológico continuo en territorio cordobés. El modelo preliminar toma sus parámetros de la base de datos de parámetros de SWAT. Los resultados fueron contrastados con los caudales diarios observados, mostrándose un buen desempeño del modelo. A partir de estos resultados se detectaron nueve parámetros de mayor relevancia en la calidad del ajuste, relacionados a los procesos de: escurrimiento superficial, evapotranspiración, y escurrimiento subterráneo. Esta conclusión servirá como punto de partida para la futura calibración del modelo.

Palabras clave: Modelos hidrológicos, SWAT, simulación hidrológica continua.

Abstract

The preliminary results of the continuous simulation of a basin representative of the mountain region of Córdoba are presented. This simulation was carried out with the widely spread SWAT model (Soil and Water Assessment Tool). This work is developed within the framework of a research project whose objective is to quantify, through hydrological modeling, the long-term hydrological impact of forest fires in basins of the mountain region of the province of Córdoba (Argentina). The selected basin, Rio Grande in Ume Pay (tributary of the Tercero river) has the simultaneous record of precipitations and daily flows more extensive of the province, which makes it the best case of study for the application and calibration of a continuous hydrological model in the territory of Córdoba. The preliminary model takes its parameters from the SWAT parameter database. The results were contrasted with the observed daily flows, showing a good performance of the model. From these results, nine parameters of greater relevance in the quality of the adjustment were detected, related to the processes of: surface runoff, evapotranspiration, and underground runoff. This conclusion will serve as a starting point for the future calibration of the model.

Keywords: hydrological models, SWAT, continuous hydrological simulation.

1 Laboratorio de Hidráulica, departamento de Ingeniería Civil, Facultad Regional Córdoba, Universidad Tecnológica Nacional. Argentina. Maestro M. López esq. Cruz Roja Argentina. Ciudad Universitaria CP X5016ZAA Córdoba, Argentina. jweber@frc.utn.edu.ar

1. INTRODUCCIÓN

Un modelo hidrológico, en términos generales, busca representar los diferentes procesos involucrados en la distribución de la lluvia y la generación de caudales en una determinada cuenca. Los modelos pueden ser físicos, donde se representan a escala las cuencas reales, o matemáticos, los cuales parten de ecuaciones empíricas o conceptuales para representar la respuesta de la unidad hidrológica bajo diferentes condiciones hidrometeorológicas. (Weber *et al.*, 2010).

En los últimos años, se dispone con suma facilidad a través de la Internet de software de licencia libre y/o gratuita para el modelado continuo, como es el Sistema de Modelación Hidrológica del Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos, conocido como HEC-HMS (HEC, 2006). El aumento en el poder de cómputo de las modernas computadoras ha permitido ampliar el uso de los modelos hidrológicos distribuidos. Entre los continuos, merece especial atención SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*).

SWAT (Arnold *et al.*, 2012) es un modelo a escala de cuenca, desarrollado por el Dr. Jeff Arnold del Servicio de Investigación Agrícola de los Estados Unidos (ARS). SWAT fue desarrollado para predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo sobre el agua, los sedimentos y los rendimientos químicos para la agricultura en grandes cuencas complejas con diferentes tipos y usos del suelo y condiciones de manejo durante largos períodos de tiempo. Para satisfacer este objetivo, el modelo es de base física: en lugar de incorporar ecuaciones de regresión para describir la relación entre las variables de entrada y salida, SWAT requiere información específica sobre el clima, las propiedades del suelo, la topografía, la vegetación y las prácticas de manejo de la tierra que se aplican en la cuenca (Neitsch *et al.*, 2011).

La región semiárida central del país, a la cual pertenece gran parte del sector serrano y noroeste de la Provincia de Córdoba, se caracteriza por la relativa escasez del recurso hídrico. Este hecho, sumado al crecimiento

demográfico de las últimas décadas y al aumento de la dotación de agua por habitante, genera la necesidad de tener conocimiento pleno de los procesos hidrológicos dominantes, buscando no sólo representar el comportamiento en aquellos períodos con precipitaciones, responsables de las grandes crecidas, sino también en los períodos de estiaje.

El río Grande es uno de los tributarios del río Tercero (o Ctalamochita) (figura 1). Tiene sus nacientes en la vertiente oriental de la Sierra de los Comechingones, en altitudes superiores a los 2000 msnm. Aporta su caudal al aprovechamiento hidroeléctrico Cerro Pelado. Esta cuenca ha sido monitoreada a lo largo de décadas por la ex empresa Agua y Energía Eléctrica S.E. En particular, existen registros de caudales medios diarios en el río Grande, antes de su ingreso al embalse Cerro Pelado (en Ume Pay) desde el año 1957. Esto lo transforma en el registro de caudales medios diarios más extenso que se haya recopilado en esta provincia. En conjunto con esta estación, existen siete estaciones pluviométricas en la cuenca (o en su vecindad) con registros extensos, el menor de ellos de 22 años. Esta información es de acceso público a través del Sistema Nacional de Información Hídrica mantenido por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación. La disponibilidad de esta información hace de la cuenca del río Grande en Ume Pay el mejor caso de estudio para la aplicación y calibración de un modelo hidrológico continuo en territorio cordobés. Sumado a esto, la amplia disponibilidad actual de productos de sensoramiento remoto (imágenes satelitales, modelos digitales de elevación, mapas de tipo y uso del suelo, etc.) sugieren el uso de un modelo hidrológico continuo y distribuido como SWAT con ese fin, en particular si se pretende estudiar la variabilidad de la respuesta hidrológica de la cuenca ante diversas alteraciones de la misma (incendios, forestación, etc.). Como resulta natural, el pre y posprocesamiento de esta información espacialmente distribuida se realizará a través de un Sistema de Información Geográfica (GIS) como QGIS (QGIS, 2013), el cual resulta aún más atractivo desde que se encuentra disponible QSWAT, una interfaz gráfica libre para SWAT basada en QGIS.



Figura 1. Ubicación de la Cuenca del río Grande en Ume Pay

Si bien este grupo de trabajo ha comenzado a estudiar el impacto de los incendios forestales en la hidrología de eventos en las cuencas serranas (Weber *et al.*, 2013) aún no se ha avanzado en la evaluación de ese impacto a largo plazo, esto es, en la hidrología de los procesos continuos. En septiembre de 2013 (dentro del periodo de registros disponibles en la cuenca del río Grande) se registraron severos incendios forestales, cuyo impacto hidrológico debería evidenciarse en la posterior serie de caudales. Resulta atractivo evaluar estos procesos a partir de la disponibilidad de un modelo hidrológico distribuido y continuo calibrado para una cuenca serrana.

Como objetivo de este trabajo, se propone evaluar preliminarmente el desempeño del modelo SWAT aplicado a la cuenca del río Grande, identificando sus parámetros significativos, como paso inicial hacia una posterior etapa de calibración y validación del mismo.

2. METODOLOGÍA

2.1 Modelo hidrológico

Soil and Water Assessment Tool (Herramienta de asesoramiento en suelo y agua) es un modelo hidrológico de base física, simula el ciclo

hidrológico mediante los distintos procesos que lo componen (figura 2). Modela al ciclo hidrológico tanto a través del flujo superficial en la cuenca como en el flujo unidimensional en el cauce principal y sus tributarios. Además, permite simular procesos de calidad del agua.

El modelo SWAT en escala temporal se clasifica como continuo, ya que permite simular los procesos del ciclo hidrológico en periodos largos (meses o años). Permite además la distribución espacial de la información en zonas de menor tamaño a la cuenca. Inicialmente es posible dividir a la cuenca en subcuencas, esto permite diferenciar zonas dentro de la cuenca con distintas características. La información dentro de cada subcuenca es organizada mediante grupos de HRU (Unidades de Respuesta Hidrológica), estas son subdivisiones de menor tamaño a la subcuenca. Las HRU se clasifican y luego se aglutinan entre iguales, esto para caracterizar mejor a la subcuenca y lograr diferenciar zonas diferentes dentro de esta. El modelo simula los distintos procesos del ciclo hidrológico en cada HRU. Además, el modelo organiza la información de cada subcuenca por clima, agua subterránea, vías de escurrimiento y drenaje de la subcuenca (Neitsch *et al.*, 2011).

La simulación del ciclo hidrológico se efectúa mediante un balance entre los procesos representados. Esta es la base del modelo para

simular otros procesos físicos y químicos, los cuales se ven afectados por el constante movimiento del ciclo hidrológico. En fase de terreno se mencionan: arrastre de sedimentos, de pesticidas, nutrientes y bacteria. Para la fase en

conducción se mencionan: descargas y transporte de pesticidas, bacterias, nutrientes, etc.; esto en las vías principales de cada subcuenca o el cauce principal de la cuenca completa.

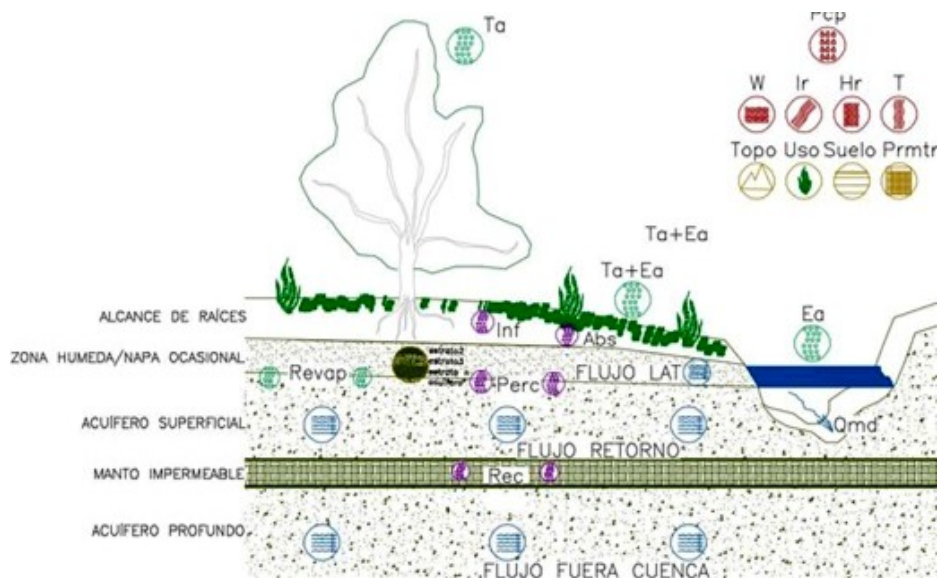


Figura 2. Procesos del ciclo hidrológico en SWAT (adaptado de Neitsch *et al.*, 2011)

2.2 Caso de estudio

La cuenca del río Grande está ubicada en la provincia de Córdoba, dentro del departamento Calamuchita ubicado al Sur-Oeste de la ciudad de Córdoba (figura 1). Dentro de la cuenca se encuentran las localidades de Villa Yacanto, El Durazno, Los Vallecitos y en proximidades se encuentra Lutti. La superficie de la cuenca es de 592,7 km², su perímetro es de aproximadamente 175,5 km, el coeficiente de compacidad o Índice de Gravelius de $Kc = 2,02$, la mayor elevación alcanzada en la cuenca es de 2699 msnm y la menor es de 813 msnm. El centroide de la cuenca se encuentra en los 32,225° de latitud Sur y los 64,847° de longitud Oeste dentro de las Sierras de los Comechingones.

Esta cuenca aporta su caudal en forma directa a la represa hidroeléctrica Río Grande, la cual lleva su nombre debido al cauce principal de la cuenca de estudio.

El río Grande nace en las alturas dentro de la cuenca homónima, al mismo aportan el río El Durazno y el río de las Letanías, los cuales son de régimen permanente, estos a su vez se

encuentran alimentados por otros arroyos más pequeños. La cuenca hidrográfica del río Grande ha sido definida estableciendo como punto de cierre el aforo en la estación “Ume Pay”, esta es una estación medidora de niveles de agua en el cauce por medio de un limnógrafo. Luego estos niveles son convertidos en caudales mediante curvas altura-caudal (h-Q).

Caracterización geológica.

La cuenca Río Grande se encuentra sobre la formación geológica Sierra de Comechingones, según Radice *et al.*, (2012) este complejo metamórfico está compuesto principalmente por metatexitas y diatexitas, de manera subordinada aparecen cuerpos de gneises biotíticos granatíferos, anfibolitas, filonitas, pequeños bancos de mármoles y cuerpos pegmatíticos graníticos. Por otro lado, según ACA-INTA, (2003) la cuenca se encuentra ubicada dentro de la denominada Sierra Grande, ubicada al Oeste de la Sierra Chica. Esta sierra constituye una amplia faja de Norte a Sur, compuesta por un complejo sistema litológico. En las partes de baja altura predomina el complejo metamórfico

(filitas, esquistos, gneis, anfibolitas y calizas) y en la parte central, más alta, dominan rocas graníticas de gran altura (cerro Champaquí 2790 msnm y los Gigantes 2374 msnm).

La cuenca se encuentra sobre la vertiente oriental de esta formación, la cual es amplia y está constituida por una serie de escalones de falla. En este costado oriental la alteración del complejo metamórfico es profunda, debido a una mayor presencia de humedad y de planos de esquistosidad subverticales que favorecen a la penetración del agua entre láminas (meteorización profunda).

En zonas altas graníticas, de mayor humedad, los suelos son someros, de texturas finas, con buenos contenidos de materia orgánica, y alto porcentaje de roca expuesta. Además, existen zonas denominadas “Pampas”, tales como la de Achala (2000 msnm) y otras menores con cobertura eólica loésica más reciente y suelos profundos como las de Yacanto.

Caracterización hidrográfica

El río Grande nace en la cuenca homónima a partir de la confluencia de los ríos de El Manzano, El Durazno y las Letanias, luego desemboca en el embalse río Grande o también conocido como Cerro Pelado (figura 3). Su curso continúa a través del embalse Arroyo Corto, luego de este continúa en forma de cauce regulado hasta llegar al embalse Rio Tercero. A continuación de este último, aguas abajo, se encuentra el embalse compensador Piedras Moras desde donde surge el Río Tercero o Ctlamochita. Esta cuenca está constituida por tres subcuencas principales y dos de menor tamaño.

Caracterización climática

El clima en la provincia de Córdoba está caracterizado en su totalidad como templado, dada la pequeña diferencia de duración entre el día más largo en verano y el más corto en invierno. Por otro lado, el posicionamiento del cordón serrano hace a la circulación de las masas de aire en el sentido NE-SO, por lo que se desplazan frentes fríos o cálidos del Sudoeste al Noreste y viceversa, esto genera abundantes precipitaciones en los meses más cálidos (ACA-

INTA, 2003). Las mayores precipitaciones en la cuenca se dan a en las zonas de mayor altitud (Oeste), disminuyendo hacia las zonas de menor altura (Este), lo que pone de manifiesto la existencia de un proceso orográfico en el área. La precipitación media anual-areal en la cuenca es de 1178 mm, para el periodo de registro entre los años 1993 a 2007 y 2008 a 2015.

Caracterización de la vegetación

La vegetación autóctona de la zona está vinculada al clima regido por alturas relativas. En una secuencia altitudinal se puede considerar que hasta los 1200 msnm domina el bosque serrano, luego un estrato intermedio (romerillal) que puede estar ausente y a mayores alturas el pastizal-gramineal, o césped de altura y bosquesillos de tabaquillo en quebradas escarpadas y protegidas (ACA-INTA, 2003).

Por otro lado, en cuanto a la vegetación no autóctona, debido a la esquistosidad y gran presencia de humedad se han observado hasta 5,00 m de alteración, originando suelos con contactos paralíticos favorables a la penetración de raíces de coníferas y otros árboles adaptados climáticamente.

Información hidrológica

Las precipitaciones se obtuvieron a través de la página web de la Subsecretaría de Recursos Hídricos, perteneciente a la Secretaría de Obras Públicas de la Nación, desde su Base de Datos Hidrológica Integrada (BDHI). Estos datos fueron analizados para evaluar la coincidencia de periodos de registro entre estaciones, a los fines de obtener una amplia cobertura dentro de la zona de estudio, en conjunto con la información de caudales. La cuenca del río Grande cuenta con siete estaciones pluviométricas, de las cuales cuatro están ubicadas dentro la misma, mientras que las tres restantes se encuentran próximas a los límites de la cuenca (figura 3).

Al igual que los datos de precipitaciones, los registros de caudales fueron descargados del BDHI de la Secretaría de Recursos Hídricos. La estación de aforo “Ume Pay” se encuentra aguas abajo de la unión del río Grande con el Durazno (figura 3). El dato registrado es el nivel de agua, el cual es medido por un limnígrafo. Las alturas

registradas son transformadas en caudales mediante curvas h-Q obtenidas del aforo de la sección del cauce. Las curvas h-Q han sido corregidas año a año por la Secretaria de Recursos Hídricos, además se cuenta con curvas diferentes de acuerdo si el caudal es de estiaje o crecida. La estación Ume Pay ha registrado datos de caudales desde el año 1957 hasta la actualidad. Se analizó la calidad de la transformación h-Q, descartando periodos de calidad dudosa.

Información climática

Los datos climáticos correspondientes a: temperaturas máximas y mínimas, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento, fueron extraídos del sitio web del National Center for Environmental Prediction's (NCEP) Climate Forecast System Reanalysis (CFSR)

(Saha *et al.*, 2010). La información está disponible en forma ininterrumpida a partir del año 1979 en una malla regular que, para la cuenca en estudio, dio lugar a cuatro estaciones a considerar.

Información satelital

La determinación de los distintos usos del suelo (cobertura vegetal) de la cuenca se realizó indirectamente a través del uso de imágenes satelitales. Para esto se utilizaron imágenes LandSat correspondientes a las misiones: 4-5 TM, 7 ETM y 8 OLI/TIRS.

Información topográfica

La topografía fue descrita por medio de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Esta información fue obtenida de la Misión SRTM (Farr *et al.*, 2007).

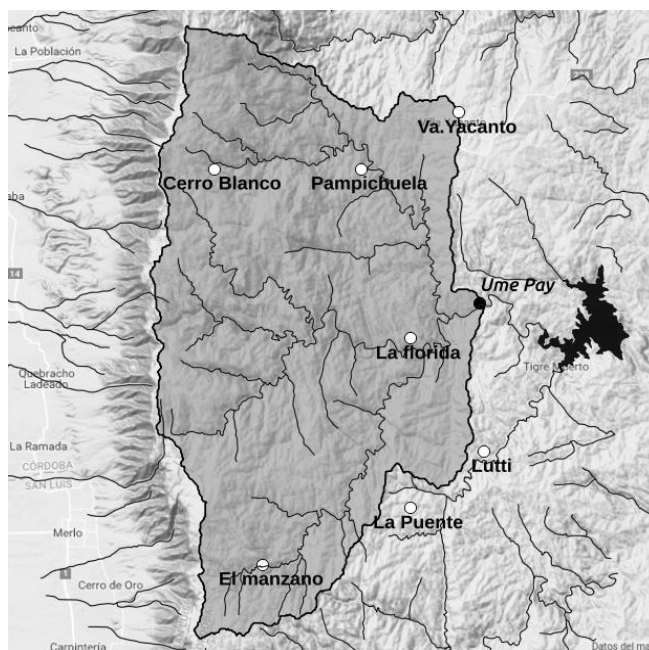


Figura 3. Cuenca del río Grande en Ume Pay: ubicación de estaciones pluviométricas y limnimétrica

3. DESARROLLO

3.1 Procesamiento de la información

La información topográfica antes descrita fue re proyectada y recortada al área de interés mediante el Sistema de Información Geográfica QGIS (QGIS, 2013). Los caudales medios

diarios publicados en la BDHI fueron recalculados y verificados previo a su uso, a los fines de evaluar la calidad y correspondencia con el dato publicado.

Se generaron mapas de cobertura vegetal (uso de suelo) a partir de la estimación del índice de vegetación normalizado (NDVI) con la

información satelital antes descripta. En la figura 4 pueden observarse estos mapas para las cuatro estaciones del año. A partir de este, y de información de campo, se identificaron las siguientes clases: roca expuesta, pajonal bajo, monte, pajonal alto, bosque autóctono, bosque de pinos.

Los mapas de tipo de suelo han sido elaborados con base en la información obtenida de las Cartas de Suelos del INTA, elaboradas en este caso para la provincia de Córdoba (ACA-INTA, 2003). Los suelos de la cuenca del río Grande han sido clasificados en su gran mayoría como Clase VII, de grandes limitaciones para su uso y en especial el cultivo. Generalmente está destinado a campos naturales de pastoreo o para bosques y refugio de la fauna existente. Son suelos con excesivo drenaje causado por una textura arenosa que acentúa la limitación

climática de la zona. Entre ellos se encuentran: udorthentes líticos, hapludoles líticos y paralíticos, hapludoles énticos y roca.

A partir del análisis de superposición temporal de los registros pluviométricos y de caudales disponibles, se identificó un periodo común comprendido entre enero de 1993 y julio de 2014, con un faltante comprendido entre diciembre de 2007 y noviembre de 2008; y con cierta incertidumbre acerca de la calidad de los caudales del periodo enero de 1993 a septiembre de 2003. Por todo ello, se decidió tomar como futuro periodo de calibración del modelo el comprendido entre 9/2003 a 11/2007, tomando como periodo de precalentamiento (*warm-up*) 1/1998 a 9/2003, y como futuro periodo de validación 1/2011 a 7/2014 (con un *warm-up* de 12/2008 a 12/2010).

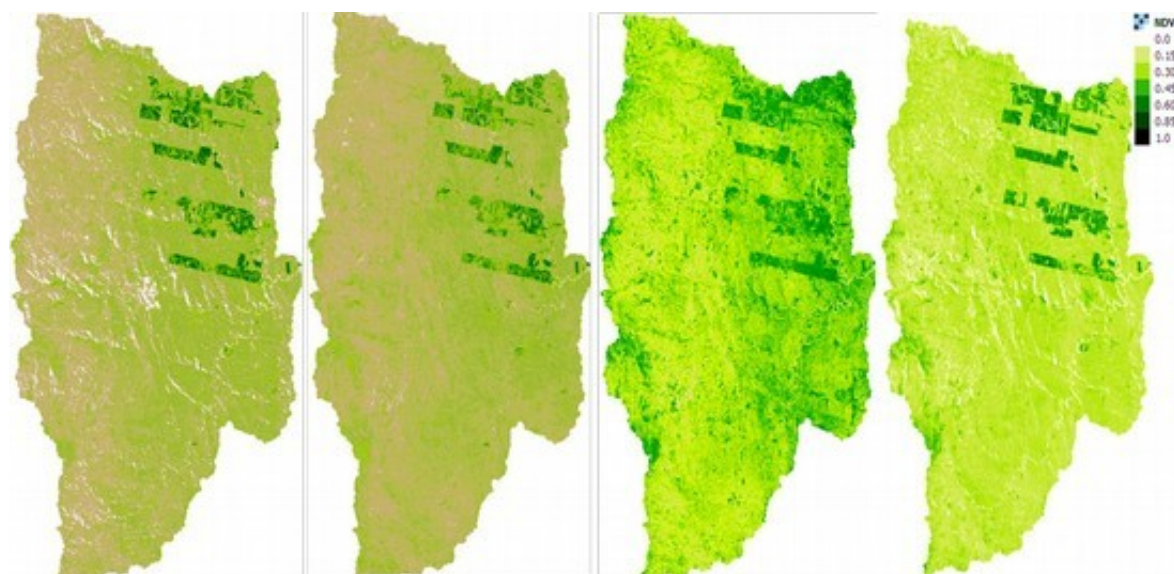


Figura 4. Mapas de NDVI para las estaciones (de izquierda a derecha, invierno, primavera, verano y otoño)

3.2 Aplicación preliminar del modelo SWAT

La implementación se realizó a través de la interfaz QSWAT, que permite la integración del modelo con el Sistema de Información Geográfica libre QGIS.

La aplicación de QSWAT exige el cumplimiento de los siguientes pasos:

Definición de cuenca y subcuencas

Se realizó a través de la herramienta TauDEM incluida en el paquete QSWAT y con base en la información del SRTM antes descripta. Para la

definición de las subcuencas se estableció un área umbral de 500 ha, generando 67 subcuencas (figura 5). Dado que QSWAT exige un valor medio (areal) de precipitación por subcuenca, se aplicó el método de interpolación basada en distancia para la estimación de los valores mencionados con base en los registros y localización de las estaciones pluviométricas reales.

Definición de las HRU

La unidad de cálculo hidrológico de SWAT es la Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU). Surgen de la intersección de mapas categóricos de: uso del suelo o cobertura vegetal, subcuenca a la que pertenecen, tipo de suelo, pendientes del terreno, caracterización de la vía de drenaje. El proceso generó 1911 HRUs (29 por subcuenca en promedio).

Definición del modelo hidrológico y elección preliminar de los parámetros

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial (PET) se seleccionó el método de Hargreaves (1975). Como método de pérdidas se utilizó el CN-SCS, con una actualización del

valor de CN con base en los valores calculados de la PET. Cabe destacar que QSWAT incorpora una base de datos con valores por defecto de los parámetros que, en caso de no contar con información de calibración, y mediante una adecuada elección, permiten realizar la simulación. En este trabajo se han utilizado estos parámetros para evaluar el desempeño preliminar del modelo.

Simulación preliminar

Una vez modificados los parámetros preliminares y actualizados en la base de datos de parámetros de SWAT, se procede a definir las condiciones de simulación del modelo. La corrida o simulación del modelo generado se hace desde el programa SWATEditor, es aquí donde se ponen en funcionamiento los motores de cálculo de SWAT. Como periodo de simulación se incluyó a los periodos de Warm Up y de Calibración, antes definidos. La simulación fue a paso diario. Como periodo de Warm Up se consideraron cinco años previos a la fecha de inicio del periodo de calibración. Como variables de salida se solicitaron todas las calculadas por SWAT, tanto de los procesos del ciclo hidrológico como las complementarias.

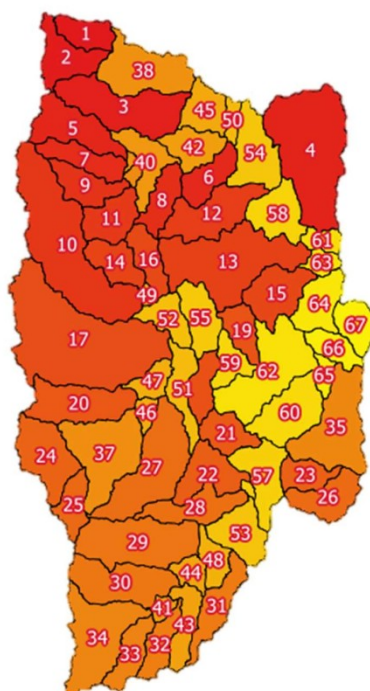


Figura 5. Subcuencas identificadas por la herramienta TauDEM del paquete QSWAT

3.3 Resultados de la simulación preliminar

La simulación preliminar permitió obtener entre las variables de salida los caudales medios diarios del río Grande, los que fueron comparados con los registrados por la estación Ume Pay. El resultado de la comparación de hidrogramas permitió determinar que SWAT

realizó una buena representación de los caudales medios diarios generados por la cuenca, esto se pudo observar mediante una simple comparación gráfica y por los indicadores estadísticos NSE (eficiencia de Nash-Sutcliffe) y R^2 (coeficiente de determinación de Pearson) (ecuaciones 1 y 2), quienes arrojaron valores de 0,70 y 0,84 respectivamente.

$$NSE = 1 - \frac{\sum(Q_i - Q_i^c)^2}{\sum(Q_i - \bar{Q})^2} \quad (1)$$

$$R^2 = \frac{\sigma(Q_i, Q_i^c)}{\sigma(Q_i) \cdot \sigma(Q_i^c)} \quad (2)$$

En estas expresiones Q_i representan los valores observados del caudal medio diario, y Q_i^c esos mismos valores estimados por SWAT; \bar{Q} la media de los caudales observados, $\sigma(x)$ el desvío estándar de la variable x , y $\sigma(x,y)$ la covarianza entre las variables x e y . Entre las variables hidrológicas distribuidas que pueden obtenerse como resultado de la ejecución de SWAT, pueden listarse: evapotranspiración real, evapotranspiración potencial, contenido de humedad del suelo, percolación, escorrentía superficial, entre otras. Cabe destacar que estos mapas en realidad representan una variable de entidades discretas, ya que en realidad SWAT arroja un resultado único (homogéneo) por cada HRU, y por tanto, se asimilará más a una variable continua (como lo es en su naturaleza) a medida que aumente el número de HRUs, y por lo tanto, el costo computacional de la solución.

3.4 Identificación de parámetros relevantes

Mediante un procedimiento de pre-ajuste manual univariado sobre un conjunto de 12 parámetros inicialmente seleccionados, fue posible detectar aquellos parámetros que mayor contribución reflejaron a la mejora de los estadísticos de ajuste (ecuaciones 1 y 2).

A partir de estos resultados se detectaron nueve parámetros de mayor relevancia en la calidad del ajuste, relacionados a los procesos de: escurrimiento superficial, evapotranspiración, y escurrimiento subterráneo:

Proceso de Escurrimiento superficial

- CN II (ad.) Numero CN método SCS en condición de humedad II

Proceso de Evapotranspiración (ET)

- EPCO (ad.) Factor de compensación de la absorción de agua de la vegetación
- ESCO (ad.) Factor de compensación de la demanda de ET en estratos superiores
- GW_REVAP (ad.) Coeficiente de proceso Revap
- REVAPMIN (mm) Valor umbral proceso Revap

Proceso de Escurrimiento profundo

- GWQMIN (mm) Valor umbral de aporte a caudal base
- GW_SPYLD (ad.) Coeficiente de rendimiento del acuífero
- GW_DELAY (días) Tiempo de demora de recarga del acuífero
- ALPHA_BF (días) Constante de recesión del caudal base

3.4 Procedimiento de calibración

El modelo fue calibrado utilizando el programa computacional SWAT-CUP (*Calibration and Uncertainty Programs*), el cual pertenece a la familia de programas de SWAT. Las técnicas y

lineamientos para la correcta calibración están descritas en el manual de uso del programa (Abbaspour, 2015).

El calibrador cuenta con cinco programas de calibración diferentes: SUFI2, PSO, GLUE, ParaSol y MCMC. Para este trabajo se utilizó SUFI en su versión 2.0 (*Sequential Uncertainty Fitting*). De acuerdo a Abbaspour (2015) en SUFI-2 la incertidumbre en los parámetros, expresada como rangos, incluye a todos las fuentes de incertidumbres tales como: la incertidumbre en las variables de entrada (por ejemplo los datos de precipitaciones), el modelo conceptual, los parámetros y los datos medidos. La propagación de las incertidumbres en los parámetros conduce a incertidumbres en las variables de salida del modelo (por ejemplo los caudales medios diarios), que se expresan como distribuciones de probabilidad del 95% de certeza. Estas se calculan dentro del 2,5% y 97,5% del acumulado usando el muestreo de hipercubo latino. Esto se conoce como la incertidumbre de predicción del 95% o 95PPU. Estos 95PPUs son los resultados del modelo en un enfoque de calibración estocástica. Es importante darse cuenta de que no se dispone de una sola señal que represente la salida del modelo, sino más bien una envolvente de buenas soluciones expresadas por el 95PPU, generadas por ciertos rangos de parámetros.

El proceso puede conceptualizarse como sigue: un único valor de parámetro conduce a una única respuesta del modelo, mientras que la propagación de la incertidumbre en un parámetro conduce a 95PPU. A medida que aumenta la incertidumbre de los parámetros, la incertidumbre en las variables de salida también aumenta (no necesariamente en forma lineal). Por lo tanto, SUFI-2 comienza asumiendo una incertidumbre de parámetros grande, de modo que los datos medidos inicialmente caen dentro del 95PPU, luego disminuye este rango de incertidumbre paso a paso mientras se monitorea el factor p y el factor r . El factor p indica el porcentaje de valores de la variable observada que se encuentran dentro de los resultados del 95PPU, mientras que el factor r es el espesor de la banda de 95PPU que envuelve a la variable observada. Luego, paso a paso, los rangos de parámetros previos se actualizan calculando la

matriz de sensibilidad (equivalente al Jacobiano) y el equivalente de una matriz Hessiana, seguido del cálculo de la matriz de covarianza, intervalos de confianza del 95% de los parámetros y la matriz de correlación. Los parámetros se actualizan de tal manera que los nuevos rangos son siempre más pequeños que los rangos anteriores y se centran en la mejor simulación. Si bien la solución es un rango de valores, esto otorga cierta flexibilidad de aplicación de los parámetros obtenidos para diferentes casos o escenarios.

La calibración está conformada por al menos cuatro etapas bien definidas: evaluación de la sensibilidad de parámetros e incidencia en los resultados, selección de funciones objetivo, procedimientos de optimización de parámetros y control de indicadores de eficiencia para re-optimizar. La evaluación de la sensibilidad de parámetros se verifica cuantitativa y cualitativamente. La cuantificación de la incidencia en los resultados del modelo tiene que ver con el alcance numérico de estos parámetros para con las variables de salida, lo que se visualiza teóricamente mediante las ecuaciones que representan a los procesos descritos y empíricamente desde los resultados. Mientras que su incidencia cualitativa se ve representada no sólo en el efecto que tiene sobre la eficiencia del modelo, la cual puede ser mayor o menor de acuerdo a la variable (o variables) de salida afectada por dicho parámetro, sino en qué periodos de la simulación tiene mayor injerencia.

Según Krause *et al.*, (2005), a veces los usuarios desestiman la calibración de un parámetro por visualizar una baja sensibilidad en los resultados, cuando en realidad puede ocurrir una incorrecta selección de la función objetivo para su optimización. Esto se debe a que los diversos criterios de eficiencia (o funciones objetivo) son más o menos sensibles en determinados periodos de la simulación de variables, por ejemplo: la eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) se muestra más sensible para calibrar parámetros vinculados a los caudales pico, pasando por alto aquellos vinculados al caudal base, mientras que el coeficiente de determinación R^2 o la NSE modificada son más adecuados para optimizar parámetros relacionados al caudal base.

Con base en lo anterior, para este trabajo, la serie de caudales observados fue considerada tanto en sus caudales pico como en los caudales base, aplicando distintas funciones objetivo para calibrar parámetros vinculados a uno u otro. Para el proceso de optimización, el modelo se corrió 300 veces por cada parámetro o grupo de parámetros, variando su valor dentro de un rango de valores pre-establecido. Luego de una primera iteración de 300 simulaciones, se evaluó gráfica y estadísticamente la influencia y el cambio en la eficiencia del modelo, controlando los factores p y r vistos previamente. Se tomaron tres iteraciones para cada parámetro o grupo. El control de indicadores de eficiencia al finalizar cada iteración es fundamental para evaluar la evolución del desempeño del modelo, además deben ser controlados los factores p y r , donde se verifica que los datos observados se encuentren dentro del 95PPU. Los indicadores de eficiencia con los que cuenta SWAT-CUP son: R^2 , NSE, wR^2 , NSE modificado, entre otros. Estos han sido elegidos dados los estudios realizados por Krause *et al.*, (2005), donde se sugiere que el indicador R^2 puede otorgar una buena evaluación para periodos de caudales de estiaje, mientras que el NSE lo hace para periodos de caudales de crecida; además explica que indicadores como wR^2 y NSE modificado evalúan mejor el desempeño de modelos para periodos tanto de estiaje como de crecida. Luego de evaluar si el modelo mejora su desempeño se elige un nuevo rango de parámetros para la próxima iteración, mientras que si empeora se debe evaluar el rango establecido inicialmente.

En caso observarse mejoras se itera sobre un mismo parámetro hasta tres veces, luego se mantienen invariables los restantes y se prosigue con otro parámetro o grupo.

El procedimiento anterior se repite hasta terminar tres iteraciones con el nuevo parámetro o grupo, luego se itera una vez más el parámetro o grupo que permaneció invariable, a los efectos de controlar si no hubo un cambio o efecto de estos últimos calibrados en el que se conservó primero. Esta regla de calibración se repite para todos los parámetros o grupo a calibrar.

4. RESULTADOS

4.1 Parámetros calibrados

Los parámetros significativos fueron optimizados mediante el programa SWAT-CUP, estos fueron agrupados para su calibración como se indicó en el apartado “Identificación de parámetros relevantes”. La calibración del parámetro CN (AMC II) se realizó utilizando la función objetivo NSE, esto mostró una mejora en la interpretación del modelo de los caudales de crecida. Por supuesto la optimización de estos parámetros con dicha función objetivo produjo una disminución en la calidad de reproducción de los caudales base o de estiaje. Para esto fue de utilidad separar al hidrograma en caudal base y de escurrimiento directo, por lo que la función objetivo le da igual peso e importancia a ambos al momento de calibrar los parámetros. Esto mostró una mejora en los caudales de salida del modelo, sin embargo, el cambio en el CN repercute en la infiltración, lo que modifica en cierta forma al caudal base. El parámetro CN (AMC II) es una condición inicial de la simulación; luego este parámetro se va ajustando por el modelo durante los cambios de humedad diarios que experimenta la cuenca, por lo que se ve relacionado con los parámetros que determinan la evapotranspiración. Considerando esto, se observaron además las modificaciones en su calibración frente a la calibración de los parámetros del proceso de evapotranspiración. Los valores resultantes del CN se resumen en la tabla 1, en función del uso y tipo de suelo de la cuenca.

Los parámetros que rigen la evapotranspiración al momento de su calibración, permitieron al modelo mejorar la interpretación de caudal base y por consiguiente de estiaje, a diferencia de lo ocurrido con el parámetro CN (AMC II). Estos fueron calibrados con la función objetivo R^2 dada su relación con el acuífero superficial para cubrir cierto déficit en la demanda de agua por evapotranspiración, dado que repercute en la regulación del acuífero y por consiguiente tanto en el caudal base como en los de estiaje de la cuenca.

Tabla 1. Parámetro CN (AMC II) calibrado en función del tipo y uso del suelo

Tipo de suelo	Uso del suelo (cobertura vegetal)					
	SWRN (Zonas estériles)	WWGR (pajonal bajo)	FESC (monte)	WETL (Pajonal alto)	MESQ (árbol autóctono)	PINE (pino)
EOLI (B)	65,7	42,7	40	54,9	58	49,1
MJEN (B)	66,7	59,3	54,3	42,9	83,4	58
MJLI (C)	74,5	58,7	78	91,1	76,6	53
ROCA (D)	77,7	84,1	82	79,9	-	-

Los parámetros EPCO y ESCO son factores que regulan la toma de agua desde el acuífero para cubrir déficit en la demanda de agua. El primer factor habilita al modelo a tomar agua de estratos más profundos, para cubrir la demanda de agua de la vegetación para su desarrollo. El segundo factor, según su valor adoptado, habilita también al modelo a tomar agua de estratos más profundos, pero para cubrir la demanda de agua por evapotranspiración de estratos superficiales.

Por otro lado, el parámetro GW_REVAP determina cuánta es el agua a reponer en la zona capilar desde el acuífero superficial, cuando existe una deficiencia para cubrir la demanda de agua por evapotranspiración y la toma directa de

la vegetación que tiene acceso al acuífero superficial por la gran extensión de sus raíces.

Este último parámetro está vinculado al REVAPMIN, que es un parámetro umbral vinculado a los procesos del acuífero superficial, este regula a partir de qué nivel alcanzado de agua por el acuífero comienza a cubrir las demandas del proceso de REVAP.

En la tablas 2 y 3 se presentan los valores obtenidos de la calibración de parámetros vinculados al proceso de evapotranspiración. Los parámetros ESCO, GW_REVAP y REVAPMIN fueron calibrados en función del uso del suelo (tabla 2), mientras que el parámetro ESCO fue calibrado en función del tipo del suelo (tabla 3).

Tabla 2. Parámetros EPCO, GW_REVAP y REVAPMIN calibrados en función del uso del suelo

	EPCO	GW_REVAP	REVAPMIN (mm)
valor inicial	0,9	0,02	800
SWRN (Zonas estériles)	0,81	0,148	594,86
WWGR (pajonal bajo)	0,83	0,042	941,18
FESC (monte)	0,6	0,054	798,41
WETL (Pajonal alto)	0,57	0	739,56
MESQ (árbol autóctono)	0,91	0,098	653,38
PINE (pino)	0,32	0,076	886,55

Tabla 3. Parámetro ESCO calibrado en función del tipo del suelo

	ESCO
Valor inicial	0,9
EOLI (B)	0,81
MJEN (B)	0,91
MJLI (C)	0,75
ROCA (D)	0,7

5. DISCUSIÓN

Los parámetros que regulan los procesos dentro del acuífero superficial fueron calibrados mediante la función objetivo R^2 , la cual demostró un buen desempeño al lograr que el modelo interprete los caudales de estiaje. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 4.

Entre estos parámetros se encuentra GWQMIN, este es un valor umbral que indica cuánto aporta el acuífero superficial al caudal base de la cuenca. Este parámetro se calibró respecto a los distintos tipos de suelo, asumiendo que sus características edafológicas varían según la formación geológica subyacente, esto hace que el comportamiento del acuífero y su constitución también varíen.

Dentro del mismo grupo está el parámetro GW_SPYLD, este es un coeficiente de rendimiento específico del acuífero superficial, el cual relaciona el volumen de agua que drena por gravedad con respecto al volumen total de la formación rocosa permeable o porosa. Luego el parámetro GW_DELAY indica el tiempo de drenaje de las formaciones geológicas, el mismo es aplicado para determinar la recarga del acuífero en un día determinado, siempre que exista percolación desde los estratos del perfil de suelo. Por último, aparece el parámetro ALPHA_BF medido en días, el cual utiliza SWAT para determinar los caudales de aporte del acuífero superficial hacia el cauce principal de la cuenca. Como puede verse en la tabla 4, los últimos dos parámetros fueron ajustados con un valor global para toda la cuenca.

Tabla 4. Parámetros GWQMIN (mm), GW_SPYLD, GW_DELAY (días) y ALPHA_BF (días) calibrados en función del tipo de suelo

	GWQMIN (mm)	GW_SPYLD	GW_DELAY (días)	ALPHA_BF (días)
Valor inicial	500	0,003	31,00	0,016
EOLI (B)	387,6	0,016		
MJEN (B)	392,88	0,013		
MJLI (C)	398,77	0,03	4,75	0,012
ROCA (D)	532,07	0,02		

5.1 Calidad del ajuste

A medida que se fueron calibrando estos parámetros se fueron registrando las mejoras observadas en el desempeño del modelo. Cada iteración conduce a una toma de decisión del usuario, por esto es conveniente evaluar diversos

indicadores estadísticos, los resultados gráficos comparativos y los mencionados factores p y r . Los indicadores de eficiencia utilizados fueron: R^2 , NSE, wR^2 , NSE modificado.

La toma de decisión del usuario implica ir ajustando el intervalo de búsqueda en el proceso

de calibración, convergiendo en valores aceptables de eficiencia del modelo. En la tabla 5 se detalla la evolución de los estadísticos de la

bondad del ajuste en el proceso de calibración, a lo largo de las iteraciones univariadas manuales realizadas.

Tabla 5. Evolución de los estadísticos de la bondad del ajuste en el proceso de calibración

Parámetros	Iteración	F. Objetivo	p-factor	r-factor	R ²	NSE	wR ²	MNSE	
	1	NSE	0,36	0,26	0,71	0,71	0,53	0,57	
CN II	2	NSE	0,3	0,14	0,72	0,72	0,55	0,57	
	3	NSE	0,27	0,12	0,72	0,72	0,56	0,57	
	1	R2	0,66	0,3	0,72	0,7	0,62	0,56	
Suelo	2	R2	0,66	0,29	0,72	0,7	0,63	0,55	
	3	R2	0,48	0,25	0,71	0,71	0,59	0,56	
	1	NSE	0,28	0,2	0,73	0,71	0,63	0,56	
ET	1	R2	0,32	0,15	0,72	0,71	0,58	0,55	
	2	R2	0,29	0,13	0,72	0,71	0,57	0,56	
	3	R2	0,28	0,11	0,72	0,71	0,57	0,56	
CN II	1	NSE	0,27	0,14	0,73	0,71	0,62	0,56	
	ET	1	R2	0,29	0,11	0,73	0,72	0,58	0,57
	Suelo	1	R2	0,51	0,22	0,73	0,72	0,59	0,57

La grafica comparativa de hidrogramas observados y simulados se muestra en la figura 6. Esta fue obtenida luego de calibrar y cargar en el modelo todos los parámetros seleccionados, donde se puede observar un buen desempeño del modelo, respaldado numéricamente por los indicadores de eficiencia de la tabla 5.

En la figura 7 se observa el detalle del año hidrológico 2004-2005, con el eje de los caudales en escala logarítmica, apreciándose con mayor detalle los comportamientos en crecidas y en estiajes.

El modelo logra interpretar con algunas dificultades los picos, generalmente subestimándolos; en el caso de los caudales de estiaje, se observa una cierta dispersión, aunque se presentan con frecuencia periodos en los cuales el modelo subestima estos caudales. Esta subestimación se observa durante todo el periodo, salvo en el año hidrológico 2006 a

2007, donde se logra una adecuada representación aunque al final se ve bien marcado un excesivo drenaje en el modelo.

Con los caudales observados y simulados se construyó una gráfica de dispersión, en la que se puede observar la calidad de representación del modelo. En abscisas se colocaron los caudales observados y en ordenadas los simulados, ubicando la recta identidad como referencia para observar la tendencia del conjunto de puntos.

Como se puede observar en la figura 8 la recta de regresión por mínimos cuadrados se encuentra por debajo de la recta identidad, con lo cual se evidencia que el modelo subestima los valores de caudales medios diarios, lo que se observa además en las figuras 6 y 7. En la figura 9 (equivalente a la figura 8 pero en escala logarítmica) se aprecia con mayor detalle este comportamiento para los caudales de estiaje.

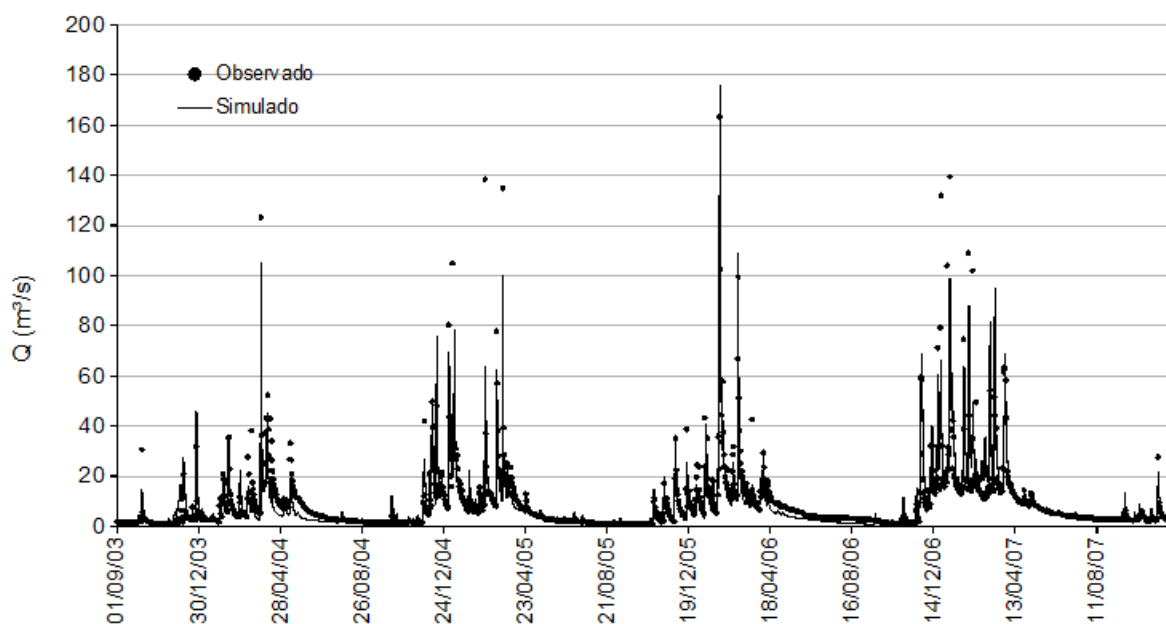


Figura 6. Hidrograma observado y simulado por SWAT con los parámetros calibrados

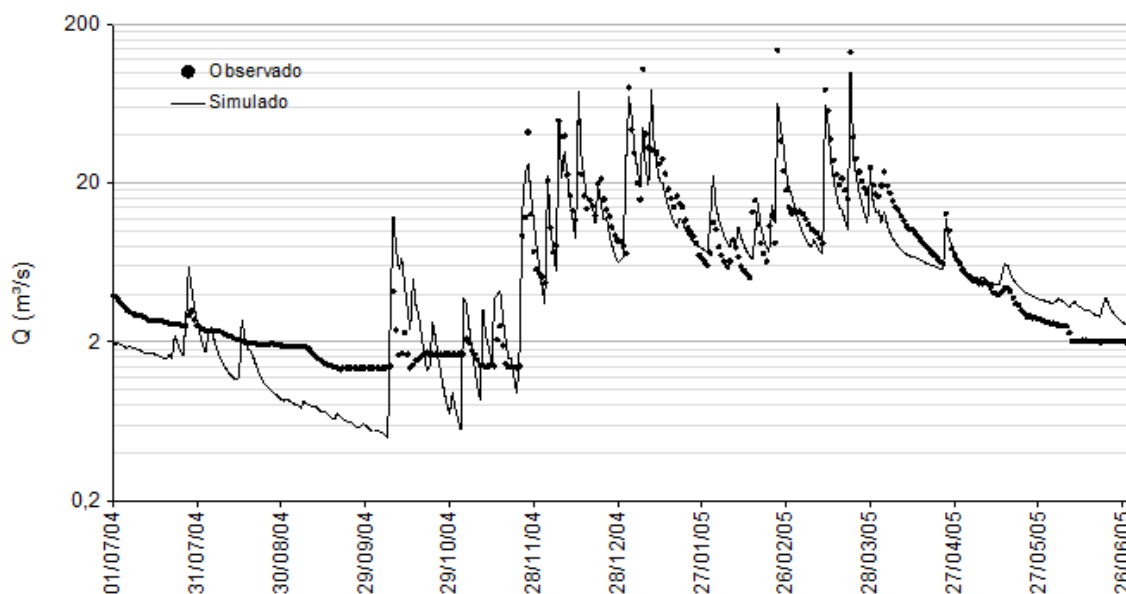


Figura 7. Un detalle de la Figura 6 para el año hidrológico 2004-2005, con los caudales en escala logarítmica

Esto último se puede apreciar en la figura 10, que muestra un histograma de frecuencias relativas de los errores porcentuales de los caudales medios diarios simulados frente a los

observados. Se observa que la distribución de frecuencias está sesgada a izquierda, lo que muestra que la subestimación de caudales por parte del modelo es la situación más frecuente.

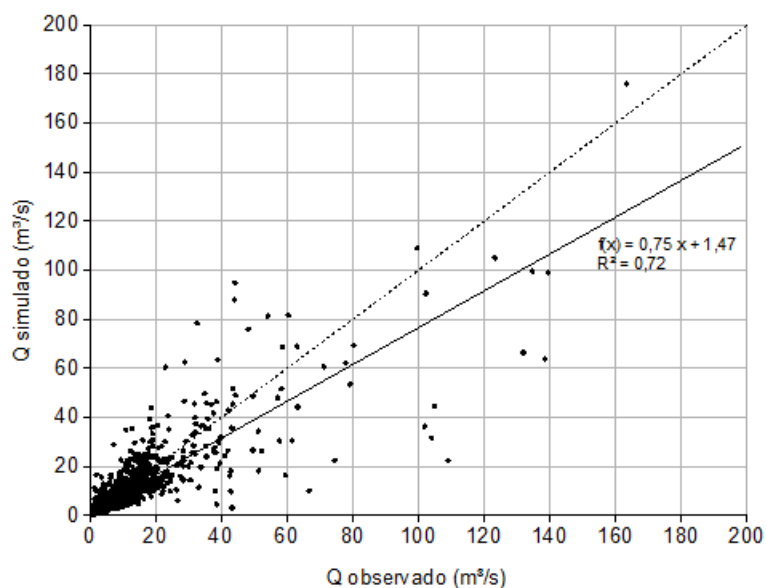


Figura 8. Caudales simulados versus caudales observados, junto con la recta identidad (línea de trazos) y la recta de regresión por mínimos cuadrados (línea continua), su ecuación y el coeficiente de determinación del ajuste

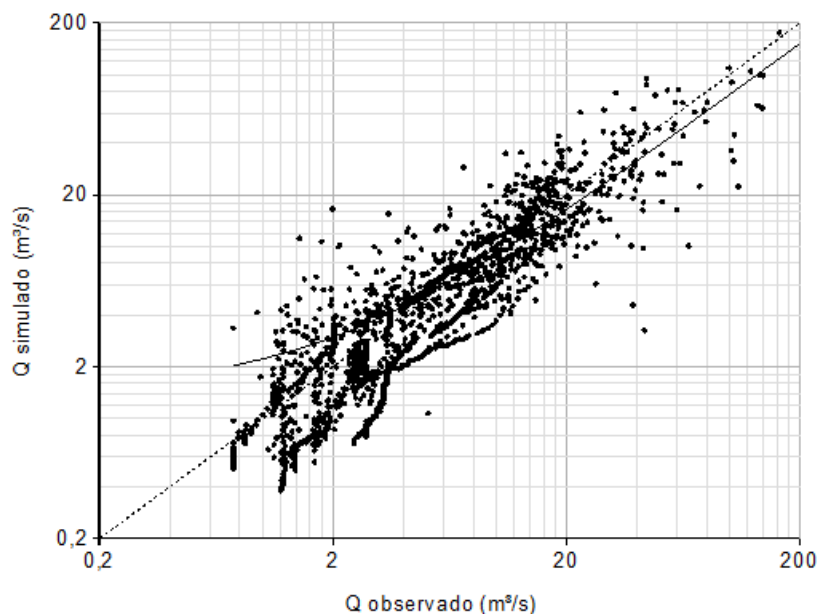


Figura 9. La información de la figura 8, en escala logarítmica

En la figura 11 se presenta el gráfico de dispersión de la figura 9, pero incluyendo los límites inferior y superior del intervalo de confianza dado por el algoritmo de calibración Sufi2. Se observa que más del 50% de los pares

(Q observado; Q calibrado) caen dentro del intervalo de confianza mencionado. Los indicadores de eficiencia evaluados dieron lugar a los siguientes resultados: R^2 : 0,73; NSE: 0,72; wR^2 : 0,59 y NSE modificado: 0,57.

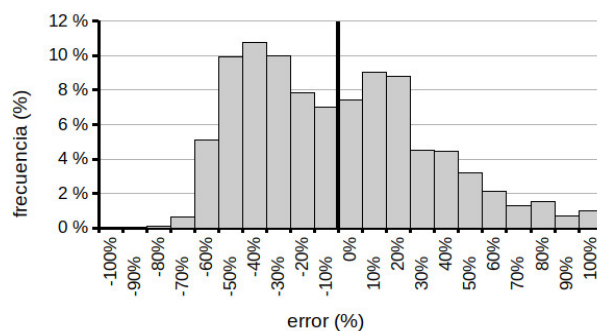


Figura 10. Histograma de frecuencias relativas de errores porcentuales

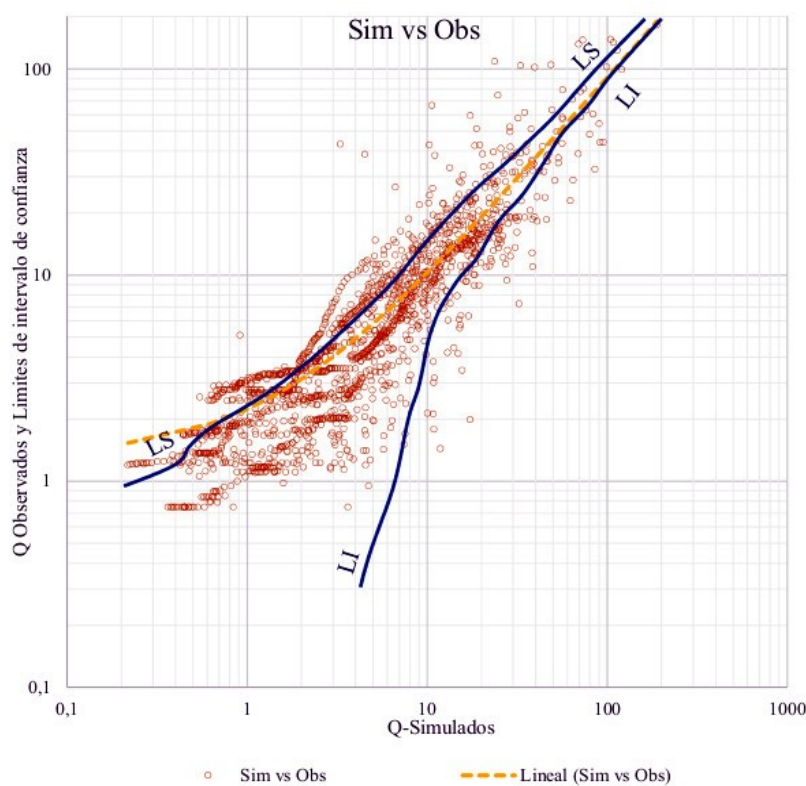


Figura 11.- Caudales simulados versus caudales observados, e intervalo de confianza de la calibración con el algoritmo Sufi2

6. CONCLUSIONES

Ha sido posible implementar el modelo SWAT en una cuenca de la región serrana de la provincia de Córdoba, recurriendo a las mejores fuentes de información disponibles en los distintos aspectos involucrados. Además, ha sido posible identificar periodos de precalentamiento, calibración y validación que se consideran adecuados para el desarrollo de las investigaciones propuestas. Con base en los

valores de indicadores de eficiencia como R^2 (0,73) y NSE (0,72), se caracteriza al modelo como muy bueno, mientras que para los indicadores wR^2 (0,59) y NSE modificado (0,57) se lo puede caracterizar como un buen modelo. Los parámetros calibrados serán de gran utilidad para extraer múltiples resultados que describan el comportamiento hidrológico de la cuenca de río Grande. Todo esto se puede realizar puesto que el desempeño del modelo ha sido favorable luego del proceso de calibración, incluyendo

información local de aquellos procesos que han sido adecuadamente observados (precipitaciones, caudales, etc.). La gran cantidad de procesos modelados por SWAT genera a la vez un gran número de variables de salida del modelo (no sólo valores de caudales medios diarios, respuesta directa de la cuenca) de las cuales es

interesante conocer su comportamiento, sobre todo de aquellas que no han sido medidas directamente en la cuenca o se desconoce totalmente su comportamiento. Entre ellas se pueden citar, la evapotranspiración potencial y real (figura 12), el aporte del flujo subterráneo al flujo base, la intercepción vegetal, etc.

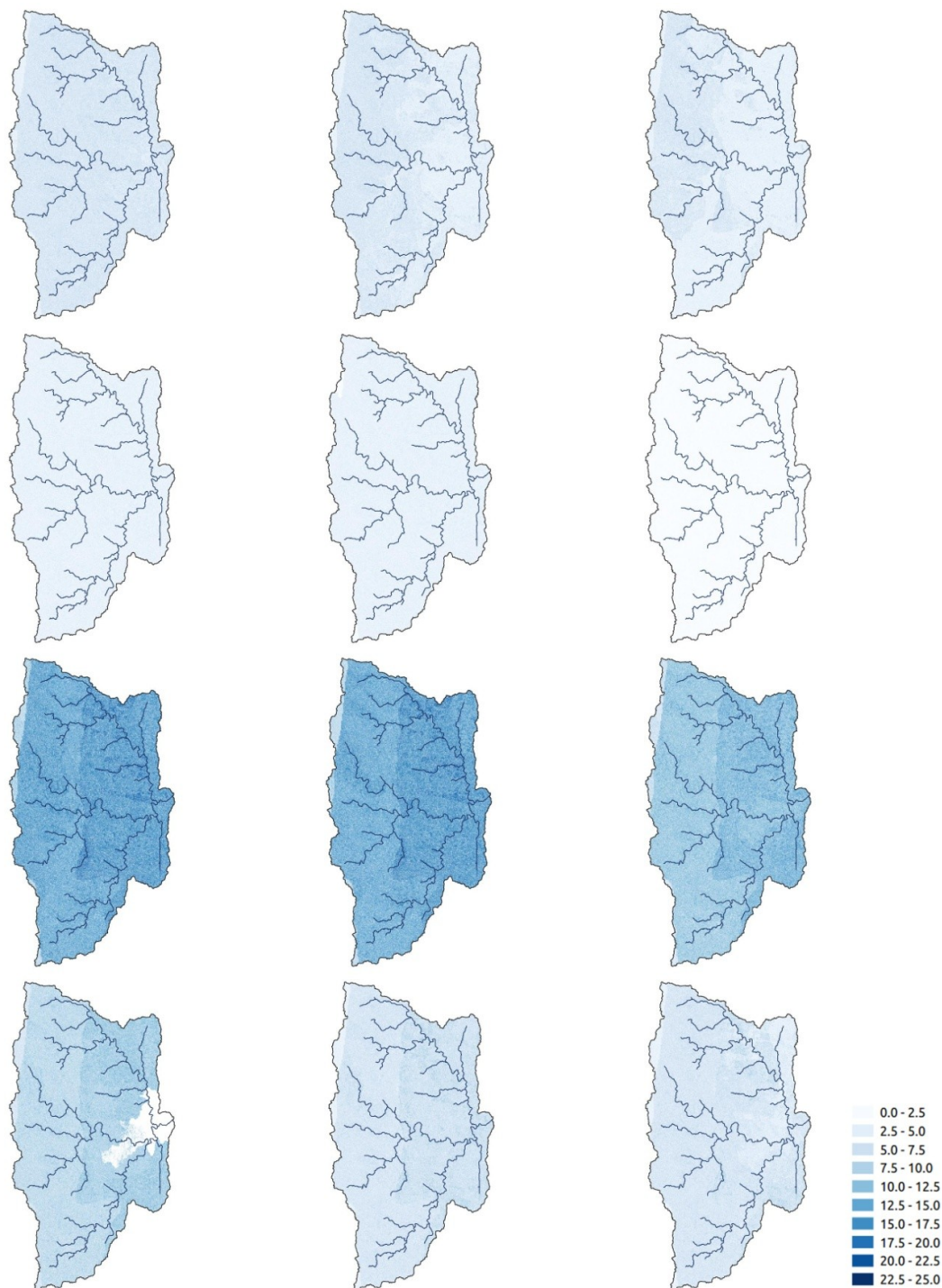


Figura 12. Evapotranspiración real diaria (mm) promedio mensual en el año hidrológico 2005-2006 (de julio/05 a junio/06, de izquierda a derecha y de arriba a abajo) calculados por SWAT. Se superpone la red de drenaje para mayor claridad

Sin embargo estos resultados deben ser interpretados considerando el nivel de incertidumbre propagado durante todo el proceso de modelación, desde el origen y procesamiento de los datos disponibles hasta la construcción del modelo y su calibración. En este sentido, caber recordar que, debido a la restricción de información disponible, la calibración llevada a cabo, por medio de una sola variable de salida (caudal medio diario) en un solo punto de la cuenca (sección de cierre) no difiere significativamente de lo que podría realizarse con un modelo concentrado.

Como trabajos futuros se prevé la validación del modelo contra los datos reservados en el periodo 1/2011 – 7/2014 (con un warm-up de 12/2008 a 12/2010), donde se verificará el comportamiento del modelo en la representación de los procesos hidrológicos de la cuenca considerada. En una

futura etapa de explotación del modelo, se espera evaluar, por medio de él, el impacto de diversos escenarios (ocurrencia de incendios forestales, alteración de la cobertura vegetal -forestación, deforestación-) en la respuesta hidrológica de la cuenca.

Se considera que los resultados logrados son alentadores, tratándose de la calibración de un modelo de simulación continua a paso diario, con las limitaciones en cantidad y calidad de información existente.

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la Universidad Tecnológica Nacional por el financiamiento recibido a través del proyecto UTN 4779.

REFERENCIAS

- Abbaspour, K. (2015). *SWAT-CUP Calibration and Uncertainty Programs*. https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf.
- ACA-INTA, Agencia Córdoba Ambiente SE e Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (2003). *Estación Experimental Agropecuaria Manfredi*. Recursos Naturales de la provincia de Córdoba. Los suelos. Nivel de reconocimiento. Escala 1:50000. Córdoba.
- Arnold, J., Moriasi, D., Gassman, P., Abbaspour, K., White, M., Srinivasan, R., Kannan, N. (2012). SWAT: Model use calibration and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508.
- Farr, T., Rosen, P., Caro, E., Crippen, R., Duren, R., Hensley, S., Kobrick, M., Paller, M., Rodriguez, E., Roth, L., Seal, D., Shaffer, S., Shimada, J., Umland, J., Werner, M., Oskin, M., Burbank, D., Alsdorf, D. (2007). The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*, 45(2). doi: 10.1029/2005rg000183
- Hargreaves, G. (1975). Moisture availability and crop production. *Transactions of the ASAE*, 18(5), 980-984.
- HEC Hydrologic modeling system HEC-HMS. (2006.). *User's manual (Version 3.1.0)*. Hydrologic Engineering Center, U.S. Army Corps of Engineers.
- Krause, P., Boyle, D., Base, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, (5) pp. 89-97.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., Williams, J. (2011). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*. Texas Water Resources Institute.
- QGIS, (2013). *Development Team QGIS Geographic Information System*. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>
- Radice, S., Arangue, J., Fagiano, M., y Pinotti, L. (2012). Análisis petrológico estructural del basamento encajonante del Batolito Cerro Áspero, Sierra de Comechingones, Córdoba. *Serie Correlación Geológica*, 28(2) 9-22.

- Saha, S., Moorthi, S., Pan, H.L., Wu, X., Wang, J. et al. 2010. The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8) 1015-1057 doi:10.1175/2010BAMS3001.1.
- Weber, J., Dasso, C., Jorquera, E. (2010). Desarrollo y calibración de un modelo hidrológico de simulación mixta. *Mecánica Computacional*. Asociación Argentina de Mecánica Computacional, Buenos Aires. Vol. XXIX (39) 4013-4037
- Weber, J. Stehli, P., Jorquera, E. (2013). *Modelación matemática del impacto hidrológico de incendios en una cuenca de las sierras de Córdoba*. Primer Congreso Iberoamericano de protección, gestión, eficiencia, reciclado y reúso del agua-CIPGER, mayo 2013, Córdoba, Argentina.