



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v9i3>

Ciencias Técnicas y Aplicadas
Artículo de Investigación

Modelación hidrológica a través del Modelo SWAT en la Cuenca del Río Cañar – Ecuador

Hydrological modeling through the SWAT Model in the Cañar River Basin – Ecuador

Modelagem hidrológica através do Modelo SWAT na Bacia do Rio Cañar - Equador

Robinson Fabricio Peña-Murillo ^I
20200867@lamolina.edu.ec
<http://orcid.org/0000-0001-6196-4039>

Juan Eduardo León-Ruiz ^{II}
juan.leon@epoch.edu.ec
<http://orcid.org/0000-0002-5304-7969>

Waldo Sven Lavado-Casimiro ^{III}
wlavado@senamhi.gob.pe
<http://orcid.org/0000-0002-0051-0743>

Melissa de Jesús Medina-Burga ^{IV}
20200864@lamolina.edu.ec
<http://orcid.org/0000-0001-8268-428X>

Correspondencia: 20200867@lamolina.edu.ec

***Recibido:** 28 de marzo de 2023 ***Aceptado:** 08 de abril de 2023 * **Publicado:** 24 de mayo de 2023

- I. Magíster Scientiae en Ingeniería de Recursos Hídricos y Posgrado de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Ingeniero Agrónomo, Doctorando en Recursos Hídricos de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- II. Doctor en Ingeniería de Recursos Hídricos y Posgrado de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Docente Investigador, Centro Experimental del Riego, Grupo de Investigación y Transferencia de Tecnología en Recursos Hídricos, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador
- III. Doctorado Hidrología y Cambio Climático, Maestría en Ingeniería de Recursos Hídricos y Posgrado de la Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- IV. Magíster Scientiae en Meteorología, Licenciada en Física de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima, Perú.

Resumen

El estudio del comportamiento hidrológico de la cuenca hidrográfica del río Cañar (Ecuador), permite cuantificar el impacto hidrológico producido por diferentes factores como la agricultura, la población y la industria, ya que a lo largo de los años estas acciones han generado problemas como deforestación, incendios la silvicultura, el avance de la frontera agrícola, el crecimiento desorganizado de las ciudades, entre otros. En este estudio se presentan los resultados preliminares de la simulación hidrológica realizada en una cuenca representativa con el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool). La cuenca seleccionada cuenta con registros de precipitaciones, temperaturas máximas y mínimas, además de caudales diarios para el período 1981-2013, lo que la convierte en un buen caso de estudio para la aplicación y calibración de un modelo hidrológico en el territorio ecuatoriano. A partir de estos resultados se detectaron nueve parámetros de mayor relevancia en la calidad del ajuste, relacionados con los procesos de: escorrentía superficial, evapotranspiración y escorrentía subterránea. En conclusión, esta investigación genera una base importante para la futura calibración del modelo.

Palabras Claves: Cuenca Fluvial; Modelo Hidrológico; SWAT; Simulación Hidrológica; Parámetros.

Abstract

The study of the hydrological behavior of the hydrographic basin of the Cañar River (Ecuador), allows quantifying the hydrological impact produced by different factors such as agriculture, population and industry, since over the years these actions have generated problems such as deforestation, fires forestry, the advance of the agricultural frontier, the disorganized growth of cities, among others. In this study, the preliminary results of the hydrological simulation carried out in a representative basin with the SWAT model (Soil and Water Assessment Tool) are presented. The selected basin has records of rainfall, maximum and minimum temperatures, and daily flows for the period 1981-2013, making it a good case study for applying and calibrating a hydrological model in Ecuadorian territory. From these results, nine parameters of greater relevance in the adjustment quality were detected, related to surface runoff, evapotranspiration, and underground runoff. In conclusion, this research generates an important basis for the future calibration of the model.

Keywords: River Basin; Hydrological Model; SWAT; Hydrological Simulation; Parameters.

Resumo

O estudo do comportamento hidrológico da bacia do rio Cañar (Ecuador), permite quantificar o impacto hidrológico produzido por diferentes fatores como agricultura, população e indústria, já que ao longo dos anos essas ações geraram problemas como desmatamento, incêndios florestais, o avanço da fronteira agrícola, o crescimento desordenado das cidades, entre outros. Este estudo apresenta os resultados preliminares da simulação hidrológica realizada em uma bacia representativa com o modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool). A bacia selecionada possui registros pluviométricos, temperaturas máximas e mínimas, bem como vazões diárias para o período 1981-2013, o que a torna um bom estudo de caso para a aplicação e calibração de um modelo hidrológico no território equatoriano. Com base nesses resultados, foram detectados nove parâmetros de maior relevância na qualidade do ajuste, relacionados aos processos de: escoamento superficial, evapotranspiração e escoamento subterrâneo. Em conclusão, esta pesquisa gera uma base importante para a futura calibração do modelo.

Palavras-chave: Bacia hidrográfica; Modelo Hidrológico; GOLPE; Simulação Hidrológica; parâmetros.

Introducción

Un modelo hidrológico, permite 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, los mismos que 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 (1).

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) es un modelo a escala de cuenca, 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 (2).

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 (3,4).

Históricamente las lluvias intensas se han analizado principalmente para el diseño de diferentes estructuras hidráulicas; en el caso de un sistema de alerta temprana, las lluvias intensas estiman la cantidad de agua precipitada durante una tormenta que posteriormente, al llegar al río, podría generar inundación en áreas pobladas cercanas al cauce (5,6).

Cabe resaltar que los fenómenos hidrológicos se caracterizan por ser variables y aleatorios; por lo que, sus cálculos probabilísticos (e.g. distribución de ajuste) poseen un grado de incertidumbre con respecto a un fenómeno extremo que pueda suceder en algún momento futuro (7).

En este contexto, los objetivos de esta investigación son: (1) caracterizar la zona de estudio en base a parámetros climatológicos y (2) determinar el comportamiento hidrológico de la cuenca en base a datos históricos disponibles.

Materiales y Métodos

Descripción del área de estudio

La cuenca hidrográfica del río Cañar se ubica en la zona centro occidental del Ecuador, misma cuyas aguas nacen en dos zonas de páramo del Sangay y del Cajas que desembocan en el Estero del Churute (Océano Pacífico), donde forma parte de las provincias del Cañar, Azuay, Chimborazo y Guayas en un 64,6 %; 27,9 %; 0,1 %; y 7,5 % respectivamente (8).

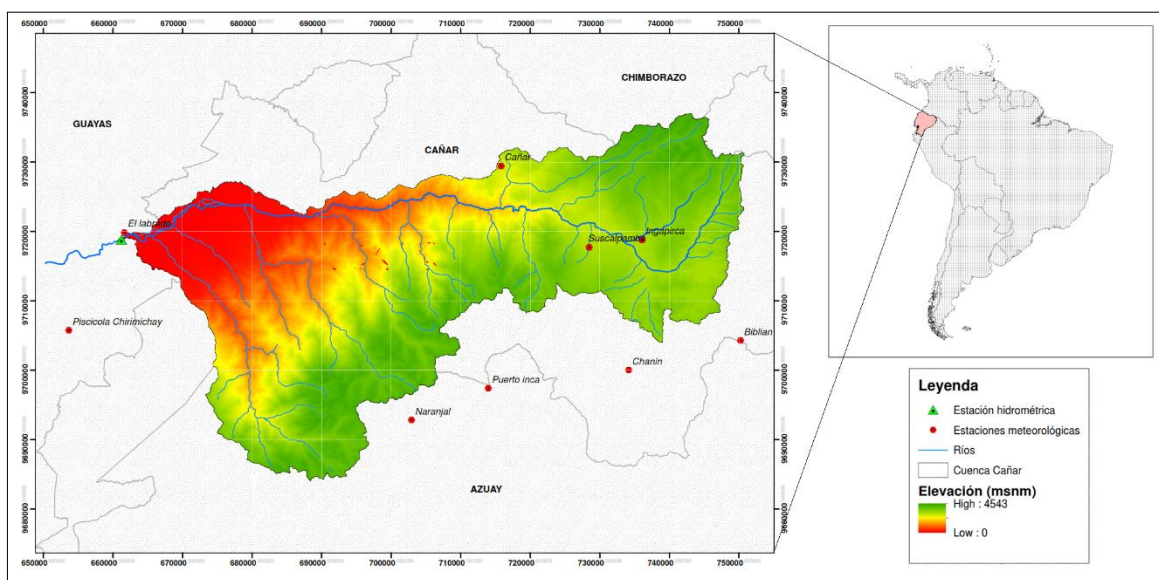


Figura N° 1. Ubicación de la Cuenca del río Cañar y sus estaciones meteorológicas e hidrométrica

La cuenca alta tiene una topografía fuertemente accidentada conformada por, la cordillera occidental de Los Andes (4 543 msnm) y abruptamente baja la elevación del terreno hasta llegar a una topografía plana en el punto de cierre de la cuenca antes de su desembocadura en el estero Churute (7 msnm), confinando un área de 2 356,64 km² (ver Figura N° 1) (8).

Las zonas afectadas por inundaciones del río Cañar se localizan principalmente en la provincia del Guayas, y en menor proporción en la provincia del Cañar; por lo que las oficinas de la Secretaria Nacional de Gestión de Riesgos de estas provincias estarían involucradas en el Sistema de Alerta Temprana (SAT) para emitir la alerta de inundación (9), ya que abarca una población de aproximadamente 154 132 personas (INEC, 2010).

Caracterización geológica

El suelo de la cuenca hidrográfica en su mayoría es inceptisol andept, con textura moderadamente gruesa, compuesto por tobas, aglomerados riolíticos y andesíticos, con permeabilidad media a baja de tipo fisuración. Este tipo de suelos son pobres, requieren de importantes aplicaciones de abono orgánico y químico para generar una buena producción. Además, se tiene un suelo inceptisol entisol con textura fina compuesto por andesita, toba, dacita y aglomerado con permeabilidad, igualmente, muy baja de tipo fisuración, ubicado en los ecosistemas de bosque húmedo y muy húmedo pre montano con cobertura de bosque natural (10).

Uso del suelo

En la cuenca del río Cañar, la cobertura vegetal está dada en su mayoría por páramo y mosaico agropecuario, teniendo además cobertura de plantaciones forestales y bosques nativos con presencia del estrato herbáceo. Las actividades productivas principales dentro de la cuenca son las agrícolas, ganaderas, silvicultura y pesca. En la agricultura, tenemos los cultivos de ciclo corto como: trigo, cebada, papas, verduras, legumbres, hortalizas; además se tiene sembríos de la caña de azúcar, banano, cacao y maíz. En la ganadería, se desarrolla la producción de leche del ganado ovino, criadero de ganado porcino y planteles avícolas (11).

Parámetros morfométricos

La variación espacial del régimen hidrológico que se desarrolla en la cuenca depende de su forma, ya que es la respuesta ante la presencia de precipitación o un evento de tormenta, debido a su relación

con el tiempo de concentración (T_c), el cual es el tiempo que toma el agua precipitada en los límites más extremos de la cuenca para llegar al punto de salida de esta (12).

Los parámetros físicos que la cuenca posee son: un perímetro de 372,7 km, un coeficiente de compacidad (K_c) de 2,7, donde este último valor indica que la cuenca posee una menor tendencia a crecidas comparándolo con un coeficiente de valor cercano a 1 que correspondería a una hoya circular. El coeficiente de forma (K_f) es de 0,11, que indica una menor tendencia a crecidas (9).

Caracterización climática

Dos corrientes de aire atraviesan el Ecuador por su latitud; una corriente fría y seca proveniente de los dos hemisferios, y una corriente caliente y húmeda proveniente de las zonas tropicales, que va desde noviembre hasta abril. Estas dos corrientes provocan en la región Costa una sola estación lluviosa, que se intensifica en marzo y en la región Amazónica, una estación lluviosa intensificada en noviembre. En la Sierra, por otro lado, se unen las corrientes provenientes de oriente y occidente, provocando un comportamiento de estación lluviosa bimodal, de marzo a junio y de octubre a diciembre (9).

El área de la cuenca del río Cañar posee 4 zonas climáticas, páramo (sobre los 3 500 msnm), valle interandino (1 000 msnm – 3 500 msnm), tropical seco (menor a 1 000 msnm) y cálido húmedo (menor a 1 000 msnm). Los cambios de temperatura del aire afectan a la infiltración y a la cantidad de precipitación (10).

La cuenca alta tiene un clima muy frío que se da por la altitud de las montañas. La temperatura media anual de este clima varía entre 4 °C a 8 °C. La vegetación es de pajonal, matorral de páramo. Mientras que, en la cuenca media se caracteriza por la presencia de un clima mesotérmico húmedo, su temperatura media varía según la altitud, oscilando entre 12 °C y 20 °C. Finalmente, la cuenca baja se caracteriza por la presencia de una estación lluviosa de diciembre a abril y un verano seco, con una temperatura media de 25 °C, que se mantiene casi durante todo el año (10).

En la cuenca alta (zona de páramo) los eventos de lluvia son normalmente de frecuencia alta, pero de baja intensidad (13). En la cuenca media, las precipitaciones máximas en la época lluviosa pueden tener una gran influencia en las inundaciones de la cuenca baja. Mientras que, en la cuenca baja las precipitaciones en la zona tropical húmeda varían de 1 000 mm a 2 000 mm anuales y en la zona tropical seca menos de 1 000 mm al año (10).

Método

El modelo SWAT en escala temporal se clasifica como continuo, ya simula los procesos del ciclo hidrológico en periodos largos de tiempo (meses o años). 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), que son subdivisiones de menor tamaño a la subcuenca. Las HRU se clasifican y luego se aglutinan entre iguales, 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 (14).

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 consideran los siguientes parámetros: arrastre de sedimentos, de pesticidas, nutrientes y bacteria. Para la fase en conducción se consideran: descargas y transporte de pesticidas, bacterias, nutrientes, etc.; esto en las vías principales de cada subcuenca o el cauce principal de la cuenca completa.

Caso de estudio

Se utilizó información climática diaria de nueve estaciones meteorológicas para el periodo 1981 al 2013, con registros de precipitación, temperatura máxima y mínima; además del caudal diario de la estación hidrométrica Puerto Inca obtenidos de la base de datos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) (12) (Ver Figura N°1).

Respecto a la información satelital, la determinación de los distintos usos del suelo (cobertura vegetal) se obtuvo del proyecto Land Cover (LC) de la iniciativa del cambio climático (CCI) liderado por la agencia Espacial Europea (ESA) con una resolución de 300 m, el tipo de suelo se obtuvo de la FAO con una resolución de 8 km, además de la información topográfica a través del Modelo Digital de Elevación (MDE), fue obtenida de la Misión SRTM.

Con la información base, se realizó la delimitación de la cuenca y la red de drenaje, luego se crearon las HRUs, se configuró y ejecuto el modelo para posteriormente obtener resultados preliminares que conlleve a una calibración y validación del modelo, para ello se usó el programa computacional SWAT-CUP (*Calibration and Uncertainty Programs*).

Procesamiento de la información

La información topográfica, mapas de cobertura vegetal (uso de suelo), al igual que el tipo de suelo antes descrita fue re proyectada y recortada al área de interés mediante el Sistema de Información Geográfica QGIS.

La implementación modelo SWAT se realizó a través de la interfaz de 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 (3):

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 descrita. Para la definición de las subcuencas se estableció un área umbral de 100 km², generando 21 subcuencas (ver Figura N° 2). 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.

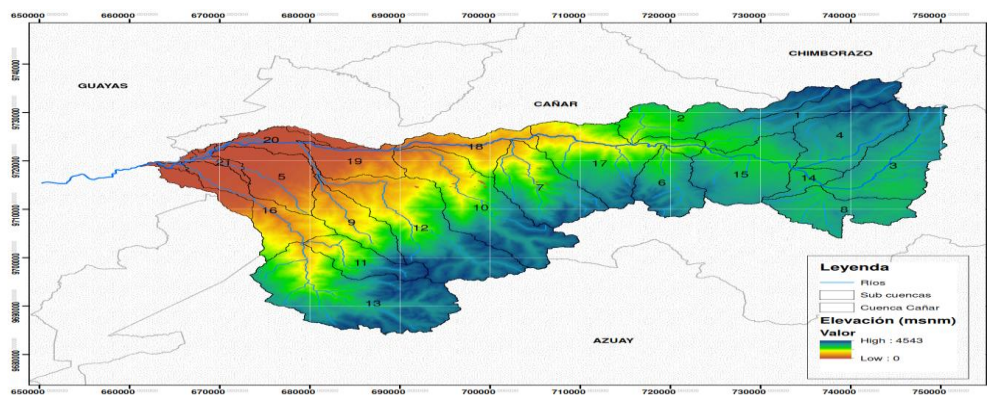


Figura N° 2. Subcuencas identificadas por la herramienta TauDEM del paquete QSWAT.

Definición de las HRUs

Las HRUs 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, lo que generó 203 HRUs para la zona de estudio.

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. 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, para esta investigación se utilizaron estos métodos 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 simulación del modelo generado se hace desde el programa SWAT Editor, es aquí donde se ponen en funcionamiento los motores de cálculo de SWAT.

La simulación fue a paso de tiempo diario y como periodo de calentamiento (Warm Up) se consideró dos años previos a la fecha de inicio del periodo de calibración.

Identificación de parámetros relevantes

A partir de los resultados se detectaron nueve parámetros de mayor relevancia en la calidad del ajuste. Estos parámetros son relacionados a los procesos de Esguerrimiento superficial, Evapotranspiración (ET) y Proceso de Esguerrimiento profundo:

Proceso de Esguerrimiento superficial

CN II (ad.) Numero CN método SCS en condición de humedad II. Este parámetro es una condición inicial de la simulación; luego es ajustado por el modelo durante los cambios de humedad diarios que experimenta la cuenca, que se relaciona con los parámetros que determinan la evapotranspiración.

Proceso de Evapotranspiración (ET)

Los parámetros EPCO (ad.) y ESCO (ad.) 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.

Respecto al parámetro GW_REVAP (ad.) 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. Además, el parámetro REVAMIN (mm), es un parámetro umbral vinculado a los procesos del acuífero superficial.

Proceso de Escurrimiento profundo

El parámetro GW_SPYLD (ad.), 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. El parámetro GWQMIN (mm), es un valor umbral que indica cuanto aporta el acuífero superficial al caudal base de la cuenca. Luego, el parámetro GW_DELAY (días) indica el tiempo de drenaje de las formaciones geológicas, que es aplicado para determinar la recarga del acuífero en un día específico, siempre que exista percolación desde los estratos del perfil de suelo. Por último, aparece el parámetro ALPHA_BF (días) medido en días, determina los caudales de aporte del acuífero superficial hacia el cauce principal de la cuenca.

Procedimiento de calibración

El modelo fue calibrado utilizando el programa computacional SWAT-CUP, el cual pertenece a la familia de programas de SWAT. Las técnicas y lineamientos para la correcta calibración están descriptas en el manual de uso del programa (15).

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 Arnold et al., (2) 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 (datos de precipitación y temperatura), el modelo conceptual, los parámetros y los datos medidos (caudales).

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 al 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 al 95 % o 95 PPU.

La calibración está conformada por al menos cuatro etapas bien definidas: evaluación de la sensibilidad de parámetros e incidencia en los resultados, selección de la función objetivo, procedimientos de optimización de parámetros y control de indicadores de eficiencia para reoptimización.

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 con la variable (o variables) de salida afectada por dicho parámetro, sino en qué periodos de la simulación tiene mayor injerencia.

Según Krause et al., (16), 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 es más adecuado para optimizar parámetros relacionados al caudal base.

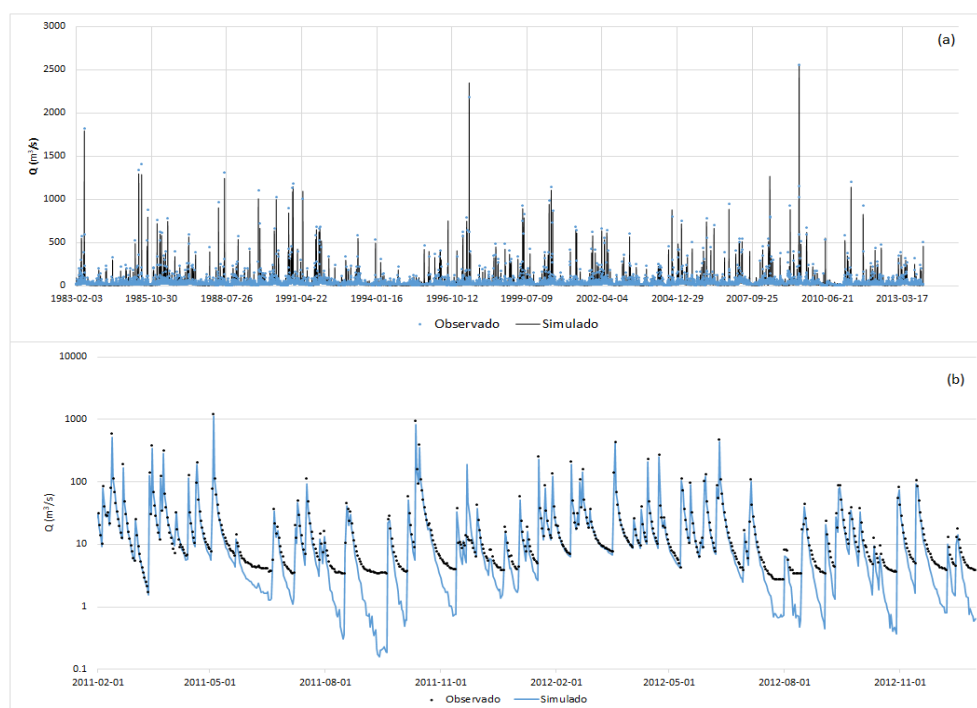
La serie de caudales observados fue considerada tanto en sus caudales pico como en los caudales base, aplicando distintas funciones objetivo para calibrar parámetros vinculados a uno u otro. Para el proceso de optimización, el modelo se simuló 300 veces por cada grupo de parámetros, variando su valor 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 (agrupa dentro de la incertidumbre de predicción del modelo, su valor oscila entre 0 – 1) y r (relaciona la anchura media de la banda 95 PPU y la desviación estándar medida debe ser menor a 1.5). El control de indicadores de eficiencia al finalizar cada iteración es fundamental para evaluar el desempeño del modelo, además deben ser controlados los factores p y r . Los indicadores de eficiencia con los que cuenta SWAT-CUP son: R^2 , NS, bR^2 , KGE, MNS, entre otros. Estos han sido elegidos dados los estudios realizados por Krause et al., (16), donde se sugiere que el indicador R^2 puede otorgar una buena evaluación para periodos de caudales de estiaje. Luego

de evaluar si el modelo mejora o no su desempeño se elige un nuevo rango de parámetros o se reevalúa para la próxima iteración. En caso de 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.

Resultados y Discusión

Simulación preliminar

Figura N°3. (a) Hidrograma observado y simulado por QSWAT para el periodo 1983 – 2013 con los parámetros calibrados. (b) Hidrograma observado y simulado para un año hidrológico 2011-2012, con los caudales en escala logarítmica.



La simulación preliminar permitió obtener, entre las variables de salida, los caudales medios diarios del río Cañar, cuyos resultados fueron comparados con los registrados de la estación Puerto Inca. 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), quienes arrojaron inicialmente valores bajos

de 0,34 y 0,45 respectivamente, pero posterior a la calibración y validación estos resultados aumentaron a 0,79 y 0,82 respectivamente (ver Figura N° 3a).

Entre las variables hidrológicas distribuidas que pueden obtenerse como resultado de la ejecución de SWAT, pueden listarse: evapotranspiración potencial, sedimentos, percolación, escorrentía superficial, entre otras. Cabe destacar que, estos mapas 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, por lo tanto, el costo computacional de la solución.

Parámetros calibrados

Los parámetros calibrados en los tres procesos como: el escurrimiento superficial CN (AMC II) su valor obtenido constituye una mejora en la interpretación del modelo de los caudales de crecida en la cuenca cañar. El proceso de evapotranspiración los parámetros EPCO y ESCO calibrados constituyen claves para lograr el mejor desempeño del modelo para la regulación de agua y cubrir el déficit en la demanda de agua. Respecto a los procesos de escurrimiento profundo GWQMIN, GW_SPYLD, GW_DELAY y ALPHA_BF ya calibrados nos permiten evaluar en la cuenca el proceso de escurrimiento hacia capas profundas respecto a la formación rocosa (ver Tabla N°1).

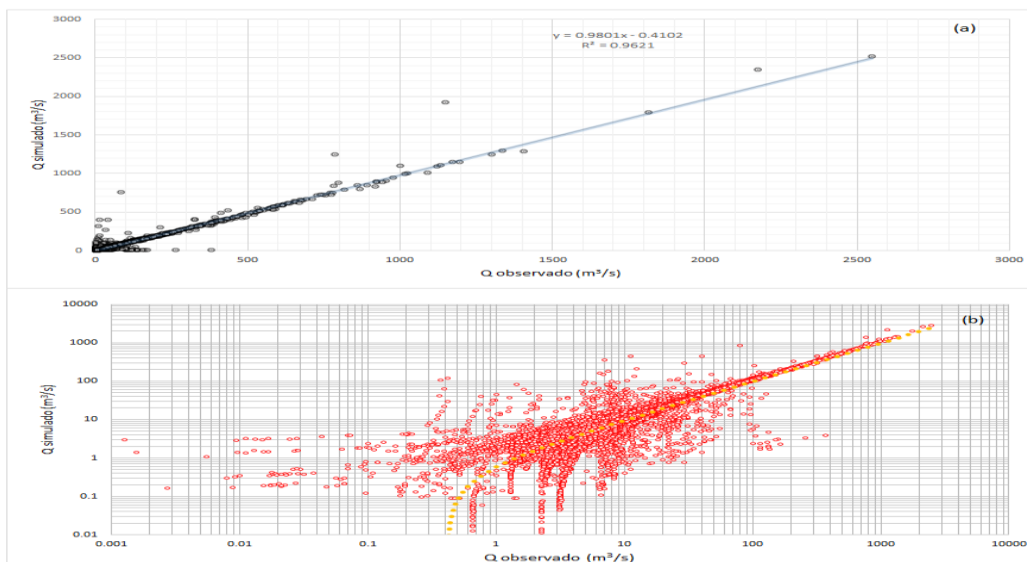
Tabla N° 1. Parámetros calibrados

CN II	EPCO	ESCO	GW_REVAP	REVAPMIN	GWQMN	GW_SPYLD	GW_DELAY	ALPHA_BF
ad.	ad.	ad.	ad.	mm	mm	ad.	días	días
78,7667	0,3600	0,4537	0,0790	3,0367	0,4067	0,2320	34,3333	0,3373

Calidad del ajuste

Figura N° 4. (a) Caudales simulados versus caudales observados, junto con la recta de regresión por mínimos cuadrados (línea continua), su ecuación y el coeficiente de determinación del ajuste. (b) (equivalente a la figura 4.a pero en escala logarítmica) se aprecia con mayor detalle este comportamiento para los caudales de estiaje.

Modelación hidrológica a través del Modelo SWAT en la Cuenca del Río Cañar – Ecuador



A medida que se calibraron los parámetros, se registraron las mejoras observadas en el desempeño del modelo. Cada iteración conduce a una toma de decisión del usuario, por esto fue conveniente evaluar diversos indicadores estadísticos, los resultados gráficos comparativos y los mencionados factores p y r . Los indicadores de eficiencia utilizados fueron: R^2 , NS, bR^2 , KGE, MNS.

La toma de decisión del implicó ir ajustando el intervalo de búsqueda en el proceso de calibración, convergiendo en valores aceptables de eficiencia del modelo.

Los indicadores de eficiencia evaluados dieron lugar a los siguientes resultados: R^2 : 0,82; NS: 0,79; bR^2 : 0.62; KGE: 0,74 y MNS: 0,67. En la Tabla N° 2 se detalla la evolución de los estadísticos de la bondad del ajuste en el proceso de calibración, a lo largo de las iteraciones realizadas.

En la Figura N° 3b. se observa el detalle del año hidrológico 2011 – 2012, con el eje de los caudales en escala logarítmica, apreciándose con mayor detalle los comportamientos en crecidas y en estiajes, respaldado numéricamente por los indicadores de eficiencia de la Tabla N° 2.

Modelación hidrológica a través del Modelo SWAT en la Cuenca del Río Cañar – Ecuador

Tabla N° 2. Evolución de los estadísticos de la bondad del ajuste en el proceso de calibración.

Parámetros	Iteración	Función objetivo	p-factor	r-factor	R ²	NS	bR ²	KGE	MNS
Suelo	1	R ²	0,78	0,26	0,86	0,84	0,64	0,76	0,73
	2	R ²	0,80	0,28	0,88	0,86	0,67	0,75	0,76
	3	R ²	0,90	0,31	0,96	0,96	0,94	0,96	0,86
ET	1	NS	0,76	0,29	0,74	0,65	0,60	0,66	0,57
	2	NS	0,77	0,22	0,72	0,73	0,57	0,71	0,61
	3	NS	0,80	0,31	0,82	0,87	0,65	0,76	0,72
CN II	1	NS	0,71	0,21	0,72	0,69	0,41	0,63	0,53
	2	NS	0,76	0,17	0,74	0,59	0,44	0,67	0,55
	3	NS	0,81	0,15	0,91	0,89	0,69	0,78	0,68

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 subvalora estos caudales.

Con los caudales observados y simulados se construyó una gráfica de dispersión, en la que se puede observar la calidad de representación del modelo (ver Figura N°4.a). En las abscisas se colocaron los caudales observados y en ordenadas los simulados, observando la tendencia del conjunto de puntos, donde la recta de regresión por mínimos cuadrados se evidencia que el modelo presenta una relación fuerte de los valores de caudales medios diarios. Además, a escala logarítmica se aprecia con mayor detalle este comportamiento para los caudales de estiaje (ver Figura N° 4b).

Conclusiones

Se ha implementado el modelo SWAT en la cuenca del río Cañar, en base a las fuentes de información disponibles en los distintos aspectos involucrados.

- Los valores de indicadores de eficiencia como R² (0,82) y NS (0,79), se caracteriza al modelo como muy bueno, mientras que para los indicadores bR² (0,62); KGE (0,74) y MNS (0,67) se lo puede caracterizar como un buen modelo, de esta manera permitirán describir el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Cañar.
- El modelo SWAT generó 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; se destaca la evapotranspiración, el aporte del flujo subterráneo al flujo base, la intercepción vegetal, etc.

- Los resultados deben ser interpretados considerando el nivel de incertidumbre durante todo el proceso de modelación, desde el origen y procesamiento de los datos disponibles hasta la construcción del modelo y su calibración, esto 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).
- La población de Puerto Inca de la cuenca del Río Cañar, es la población que ha sido afectada periódicamente por inducciones, mismo que se corrobora con los resultados obtenidos un caudal promedio de 28.064 m³/s, para lo cual es indispensable medidas de control para evitar dichas afectaciones.
- La topografía de la cuenca alta y media del río Cañar presenta pendientes pronunciadas, esta característica de la topografía acelera el desplazamiento del agua precipitada y sedimentos en los cursos de agua durante un evento de tormenta.
- La evaluación del desempeño del modelo hidrológico según Nash-sutcliffe (NSE) fue 0,96 y el coeficiente de correlación de Pearson 0,98.

Agradecimientos

Se agradece al equipo técnico del Programa de Doctorado en Recursos Hídricos de la Universidad Nacional Agraria la Molina, así como al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), por el apoyo brindado en esta investigación.

Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses financieros ni personales que puedan influir inapropiadamente en el desarrollo de esta investigación.

Referencias

1. Weber J, Stehli P, Jorquera E. 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. 2013;

2. Arnold J, Moriasi D, Gassman P, Abbaspour K, White M, Srinivasan R, et al. SWAT: Model use calibration and validation. *Trans ASABE*. 2012;4:1491–508.
3. Uribe N. Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. Versión SWAT2005. *SWAT Soil and Water Assessment Tool*. 2010;1–47.
4. Hargreaves G. Moisture availability and crop production. *Transactions of the ASAE*. 1975;980–4.
5. Lavado W. Modelos Matematicos. Apuntes de modelo swat. 2021;
6. Farr T, Rosen P, Caro E, Crippen R, Duren R, Hensley S, et al. The Shuttle Radar Topography Mission. *Reviews of Geophysics*. 2007;
7. OMM. Guía de prácticas Hidrológicas Volumen II Gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas. 2011;6.
8. Arteaga M. Evaluación del Modelo Hidrológico HEC-Hms para la predicción hidrológica, en la Cuenca Baja del Rio Cañar. *Hydrology*. 2017;
9. INAMHI. Sistema de alerta temprana Cuenca Cañar. *Hydrology*. 2013;
10. Vaca R. Estudios de Impacto Ambiental para la ejecución de dragado del Río Cañar desde su desembocadura en el Estero Churute hasta 12 Km. aguas arriba, agua que se encuentra bajo la influencia de la marea agua arriba, Cantón Naranjal, Parroquia Santa Rosa de Flan. *Hydrology*. 2011;
11. INEC. Censo económico. 2010;
12. INAMHI. Base de datos climatológicos e hidrométricos del Ecuador. 2020;
13. Buytaert W. The properties of the soils of the south Ecuadorian páramo and the impact of land use changes on their hydrology. *Ciencias de la Agricultura y Biología*. 2017;
14. Neitsch S, Arnold J, Kiniry J, Williams J. *Soil and Water Assessment Tool*. Water Resources Institute. 2011;
15. Abbaspour K. *SWAT-CUP Calibration and Uncertainty Programs*. 2015;
16. Krause P, Boyle D, Base F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*. 2005;5:89–97.