

ESTUDIO DE LAS METODOLOGÍAS DE CALIBRACIÓN PARA LA APLICACIÓN
DEL MODELO SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT) EN LA
CUENCA DEL RÍO SURATÁ

ASTRID CONSUELO MOLANO ARIZA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2016

ESTUDIO DE LAS METODOLOGÍAS DE CALIBRACIÓN PARA LA APLICACIÓN
DEL MODELO SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT) EN LA
CUENCA DEL RÍO SURATÁ

ASTRID CONSUELO MOLANO ARIZA.

Trabajo de grado en la modalidad de Investigación para optar por el título de
Ingeniera Civil

Directora

ISABEL CRISTINA DOMINGUEZ RIVERO
PhD in Agriculture, Food and Rural Development

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2016

DEDICATORIA

*Dedico este proyecto principalmente a Dios por guiarme en el camino correcto,
quien me dio las herramientas necesarias para enfrentar la vida.*

*A mis Padres María Consuelo Ariza Urichechea y Uriel Arnovi Molano Martínez
quienes me han brindado su apoyo incondicional, amor y sabiduría.*

*A mis hermanos Milena, Ronald y Fernanda con quienes hemos compartido
sueños y anhelos.*

ASTRID CONSUELO MOLANO ARIZA

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por el esfuerzo y dedicación, sin el cual no hubiera alcanzado este sueño de ser Ingeniera Civil.

.A la Directora del Proyecto la Ingeniera Isabel Cristina Domínguez el esfuerzo y dedicación que ha mostrado en este Proyecto de investigación.

También quiero dar las gracias hermanos y amigos que me han animado a terminar este proyecto de investigación.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCION.....	16
1. OBJETIVOS.....	19
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	19
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
2. MATERIALES Y MÉTODOS	20
2.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO SWAT	20
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	23
3.1 VARIABLES Y PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN EN EL MODELO SWAT .	23
3.2 DEFINICIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO	24
3.2.1 Coeficiente de Nash Sutcliffe.	24
3.2.2 Coeficiente de Determinación R^2	25
3.3. METODOLOGIAS DE CALIBRACIÓN.....	25
3.3.1 Metodología: Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE).	25
3.3.2 Metodología: Parameter Solution (ParaSol).....	26
3.3.3 Metodología: Bayesian Inference Markov Chain Monte Carlo (MCMC).....	27
3.3.4 Metodología Sequential Uncertainty Fitting 2 (SUFI-2).....	28
3.4. APLICACIÓN DE LAS METODOLOGIAS DE CALIBRACIÓN.....	31
3.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS METODOLOGIAS DE CALIBRACIÓN	37
3.6. PROPUESTA DE LA METODOLOGÍA CON MAYOR POTENCIAL DE APLICACIÓN PARA CALIBRACIÓN DE SWAT EN LA CUENCA DEL RIO SURATÁ	38
4. CONCLUSIONES.....	42

BIBLIOGRAFÍA.....50

ANEXOS57

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización Geográfica de la Cuenca del Río Suratá	38
Figura 2. Límites de la Cuenca del Río Suratá	39

LISTA DE GRÁFICAS

	Pág.
Gráfica 1. Funcionamiento de SWAT	22
Gráfica 2. Metodologías de Calibración usadas en la literatura revisada:	31
Gráfica 3. Variables de Calibración de acuerdo a la Síntesis	36

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Parámetros de Calibración del modelo SWAT.....	23
Tabla 2. Características de las cuencas donde se han realizado estudios que aplican las metodologías de calibración y parámetros calibrados.....	33
Tabla 3. Ventajas y Desventajas de las Metodologías de calibración	37
Tabla 4. Criterios de Calibración para la aplicación del modelo SWAT.....	38

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A: CONFIGURACIÓN DE LOS PARAMETROS POR TIPOS	57
ANEXO B: ARCHIVOS DE SALIDA DEL SOFTWARE SWAT.....	69
ANEXO C. GLOSARIO DE LOS PARÁMETROS SENSIBLES A LA CALIBRACIÓN	73
ANEXO D: SÍNTESIS DE LOS ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN ACERCA DE LAS METODOLOGÍAS DE CALIBRACIÓN DEL MODELO SWAT	79
ANEXO E: COMPARACIÓN DE CRITERIOS DE DOS CASOS DE ESTUDIOS: ESTUDIO 1: CUENCA DEL RÍO CHAOHE. Y ESTUDIO 2: CUENCA DEL RÍO THUR	82
ANEXO F: TIPOS DE SUELO UBICADOS EN LA CUENCA DEL RIO SURATÁ	85
ANEXO G: USOS DEL SUELO DE LA CUENCA DEL RIO SURATÁ.....	86
ANEXO H: ESQUEMA DE LA CALIBRACIÓN DE LA METODOLOGÍA ESCOGIDA.....	87

GLOSARIO

HRU: Unidad de Respuesta Hidrológica. Es la combinación única entre el suelo, el tipo de suelo y la pendiente de la subcuenca

NSE NS ENS: Coeficiente de Eficiencia Nash-Sutcliffe (rango de valor ≤ 1);

SCE SCE-UA: Algoritmo de búsqueda global para la minimización de una función única para la obtención de 16 parámetros;

HPD: Región de densidad de probabilidad alta;

95PPU: 95% de incertidumbre de predicción;

Factor P: Es el porcentaje de los datos observados en la banda 95PPU (su rango se encuentra entre los valores de 0 a 1);

R²: Es el Coeficiente de determinación

Factor R: el espesor medio de la banda 95PPU dividida por la desviación estándar de los datos medidos (gama de valor 0-1)

SWAT CUP: Procedimientos de calibración de incertidumbre de SWAT;

CANAL PRINCIPAL: Es la trayectoria de flujo más larga de la subcuenca;

REVAP: Término utilizado por los autores de SWAT refiriéndose al agua que puede moverse desde el acuífero superficial hasta la zona insaturada.

USLE: Conjunto de factores que se utilizan en el cálculo de las Cargas de Sedimentos.

RESUMEN

TÍTULO*: ESTUDIO DE LAS METODOLOGÍAS DE CALIBRACIÓN PARA LA APLICACIÓN DEL MODELO SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT) EN LA CUENCA DEL RÍO SURATÁ.

AUTOR: ASTRID CONSUELO MOLANO ARIZA **

PALABRAS CLAVE: SWAT; criterios de calibración; GLUE; ParaSol; SUFI-2; INTERFERENCIA BAYESIANA MCMC.

DESCRIPCIÓN:

La modelación de las cuencas hidrográficas cada vez es más utilizada para apoyar las decisiones sobre la distribución del agua, cambio en el uso del suelo y control de la contaminación. El modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) es considerado como uno de los modelos más eficaces para la evaluación de los problemas de contaminación que ocurren en una cuenca [1]. La utilización de SWAT involucra las etapas de Ingreso a las Bases de datos, Parametrización, Calibración y Validación de los datos. La calibración es un factor clave para reducir la incertidumbre y aumentar la capacidad de predicción [2] y por lo tanto, se constituye como el paso fundamental en la implementación de los modelos de cuenca. En los últimos años se han desarrollado diferentes técnicas de calibración para la modelación de una cuenca. Por consiguiente, se debe revisar la literatura con el fin de investigar las diferentes metodologías para calibrar el modelo con el software de SWAT, identificando las condiciones para su aplicación. En este estudio, se revisaron y compararon las siguientes metodologías: Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE), Parameter Solution (ParaSol), Bayesian Inference, Markov Chain Monte Carlo (MCMC) y Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2). La comparación incluyó las ventajas, desventajas de cada metodología de acuerdo a ciertos criterios planteados por diferentes autores en la literatura científica publicada. A partir de esta revisión y teniendo en cuenta las características físicas de la Cuenca del Río Suratá se propone la metodología de calibración más adecuada para la aplicación del modelo SWAT en dicha cuenca. Los resultados de esta revisión sirven como base para la construcción de un modelo calibrado que apoye los programas de descontaminación que necesita esta cuenca.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas, Escuela de Ingeniería Civil, Directora: Isabel Cristina Domínguez Rivera
Ing. MSc. PhD. in Agriculture, Food and Rural Development

ABSTRACT

TITLE*: SURVEY: CALIBRATION METHODOLOGIES FOR THE APPLICATION OF "SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT)" MODEL IN THE SURATÁ RIVER BASIN

AUTHOR: ASTRID CONSUELO MOLANO ARIZA **

KEYWORDS: SWAT; criteria for calibration; GLUE; ParaSol; SUFI-2; BAYESIAN INFERENCE MCMC.

DESCRIPTION

River basin modeling is increasingly used to support decisions about water distribution, land use change, and pollution control. The model Soil and Water Assessment Tool (SWAT) is considered one of the most effective models for assessing pollution problems that occur in a watershed [1]. The use of SWAT involves stages of entry to databases, parameterization, calibration and validation. Calibration is a key factor to reduce uncertainty and increase the predictability [2] and therefore is established a key step in implementing watershed models. In recent years, different calibration techniques for modeling a watershed have been developed. Therefore, reviewing the literature is important to investigate the different methodologies to calibrate models with the SWAT software, and to identify the conditions for their implementation. In this study, the calibration methodologies: Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) Parameter Solution (PARASOL), Bayesian Inference Markov Chain Monte Carlo (MCMC) and Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2) were reviewed and compared. The comparison includes the advantages, disadvantages of each methodology according to certain criteria set by different authors in published scientific literature. From this review, the most appropriate calibration methodology for the implementation of SWAT model in the Suratá basin is proposed. The results of this review serve as a basis for building a calibration model to support programs that need decontamination basin.

* Working Grade

** Physico-mechanical Engineering Faculty of the School of Civil Engineering, Director: Isabel Cristina Dominguez Rivera Sanitary Engineer. MSc in Water and Environmental Management. PhD in Agriculture, Food and Rural Development.

INTRODUCCION

El agua es un recurso vital para el desarrollo de los seres humanos y el ecosistema. Debido al aumento de las poblaciones, contaminación del agua, cambio del uso de la tierra, y cambio climático, el agua está pasando por una crisis de desarrollo sostenible en el mundo [3]. Como estrategia para hacer frente a esta crisis, los países en desarrollo que quieren ir hacia un camino de progreso y gestión eficiente están implementando la Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH). “La GIRH es un proceso que promueve el manejo y desarrollo del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar económico y social resultante de manera equitativa sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas vitales”¹⁾ [4]. Bajo el enfoque de GIRH, la cuenca es una unidad geográfica en la que se produce un vínculo entre las actividades económicas, ambientales y sociales con sus recursos naturales [5].

Uno de los efectos de la crisis del agua, es el deterioro de la calidad del agua de los ríos, por el incremento de las aguas residuales no tratadas, la producción de nutrientes que causan la proliferación de ciertas algas y la contaminación de metales pesados, entre otros [6]. En el departamento de Santander, el área Metropolitana de Bucaramanga tiene como fuente de abastecimiento la subcuenca del río Suratá. Esta subcuenca presenta un grado alto de contaminación debido a factores como la extracción minera del oro, la ganadería intensiva, la agricultura extensiva y el aumento de las aguas residuales no tratadas que llegan a este río [7].

El uso de modelos avanzados ayuda a determinar la relación entre las condiciones ambientales de la cuenca hidrográfica y los procesos fisicoquímicos que se presentan en las fuentes superficiales [8]. La modelación es una herramienta que

¹ Asociación Mundial del Agua, “Gestión Integrada de Recurso Hídricos,” no. Estocolmo, p. 22, 2000

podría contribuir al estudio del impacto de las actividades humanas sobre la calidad del agua en esta cuenca y a la visualización de medidas para disminuir estos impactos.

El Soil and Water Assessment Tool (SWAT) es un modelo que permite hacer un estudio detallado sobre una cuenca, *“SWAT es un modelo hidrológico distribuido que opera en un intervalo de tiempo diario y está diseñado para predecir los impactos a largo plazo de las prácticas de uso del suelo sobre el recurso hídrico y los sedimentos”*².

En diferentes lugares del mundo como Etiopia (Relacionando la Concentración y enriquecimiento de los Sedimentos a partir del contenido de humedad, la pendiente y la intensidad de la lluvia [9]), Jamaica (Modelando la variabilidad hidrológica de los recursos de Agua Dulce en el río Cobre [10]), Pakistán (Utilizando la modelación hidrológica para la cuenca Simly [11]) y China (Modelando la erosión del suelo y el transporte de sedimentos en la cuenca del río sureste [12]) han aplicado SWAT para la modelación de los flujos de agua y los sedimentos. Varios estudios han demostrado que SWAT es la herramienta más utilizada en la modelación de las superficies hidrológicas y de los sedimentos de las cuencas hidrográficas [10], [11], [12].

Sin embargo, cuando se usa un modelo como SWAT es necesario definir cómo se hará la calibración puesto que ésta proporciona estimaciones de los valores de los parámetros del modelo que minimizan el error entre las predicciones del modelo y las observaciones medidas. Por lo tanto, la calibración se constituye en una de las etapas fundamentales en los procesos de modelación de las cuencas hidrográficas, permitiendo una mayor aproximación a las condiciones reales de la cuenca [13].

² B. Lin, X. Chen, H. Yao, Y. Chen, M. Liu, L. Gao, and A. James, “Analyses of landuse change impacts on catchment runoff using different time indicators based on SWAT model,” *Ecol. Indic.*, vol. 58, pp. 55–63, Nov. 2015

Este estudio revisa cuatro metodologías, frecuentemente empleadas para la calibración del SWAT y propone la de mayor aplicabilidad para las condiciones de la cuenca del río Suratá, de acuerdo con los métodos, parámetros y criterios de calibración.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

- Proponer una metodología para la calibración y aplicación del modelo SWAT en la cuenca del Río Suratá.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar y Analizar las metodologías de calibración existentes que han utilizado la aplicación del modelo SWAT.
- Establecer parámetros y criterios de calibración sobre la calidad del agua para la selección de una metodología con aplicación del modelo SWAT.
- Identificar la metodología de calibración del modelo SWAT con mayor potencial de aplicación en la cuenca de Río Suratá.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para entender las diferentes metodologías de calibración fue necesario hacer una revisión de la literatura sobre el modelo SWAT y el comportamiento de las metodologías con base en los parámetros de calibración. La revisión de literatura se realizó en las bases de datos Science Direct, Scopus y Springer. Se revisaron artículos con las palabras clave: SWAT; criterios de calibración; GLUE; ParaSol; SUFI-2; Interferencia Bayesiana MCMC. Se consideraron artículos de investigación publicados entre los años 2005 – 2016, con el propósito de encontrar la metodología de calibración que más se ajuste a la Cuenca del Río Suratá.

Los principales artículos consultados fueron en revistas científicas de las áreas de Hidrología, e Ingeniería Hidrológica. La información de los artículos consultados fue procesada y organizada mediante tablas. El análisis se realizó comparando lo reportado por los autores en cuanto al desempeño de las metodologías de calibración frente a características como: la estimación de los parámetros, la función objetivo, y la incertidumbre de predicción de cada metodología.

2.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO SWAT

El modelo SWAT divide la cuenca hidrográfica en subcuencas, cada subcuenca se conecta a través de un afluente y se divide aún más hasta llegar a la Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU). La HRU es la combinación única entre el suelo, uso del suelo y tipo de pendiente de la subcuenca [14]. El software SWAT modela la hidrología y los sedimentos al nivel de HRU. El agua y los sedimentos transportados de cada HRU son encaminados a través de la red de corriente a la salida de la cuenca [15] [16].

Para realizar un estudio con el modelo SWAT es necesario ingresar datos de entrada y definir los parámetros de calibración. Dependiendo de los objetivos de la

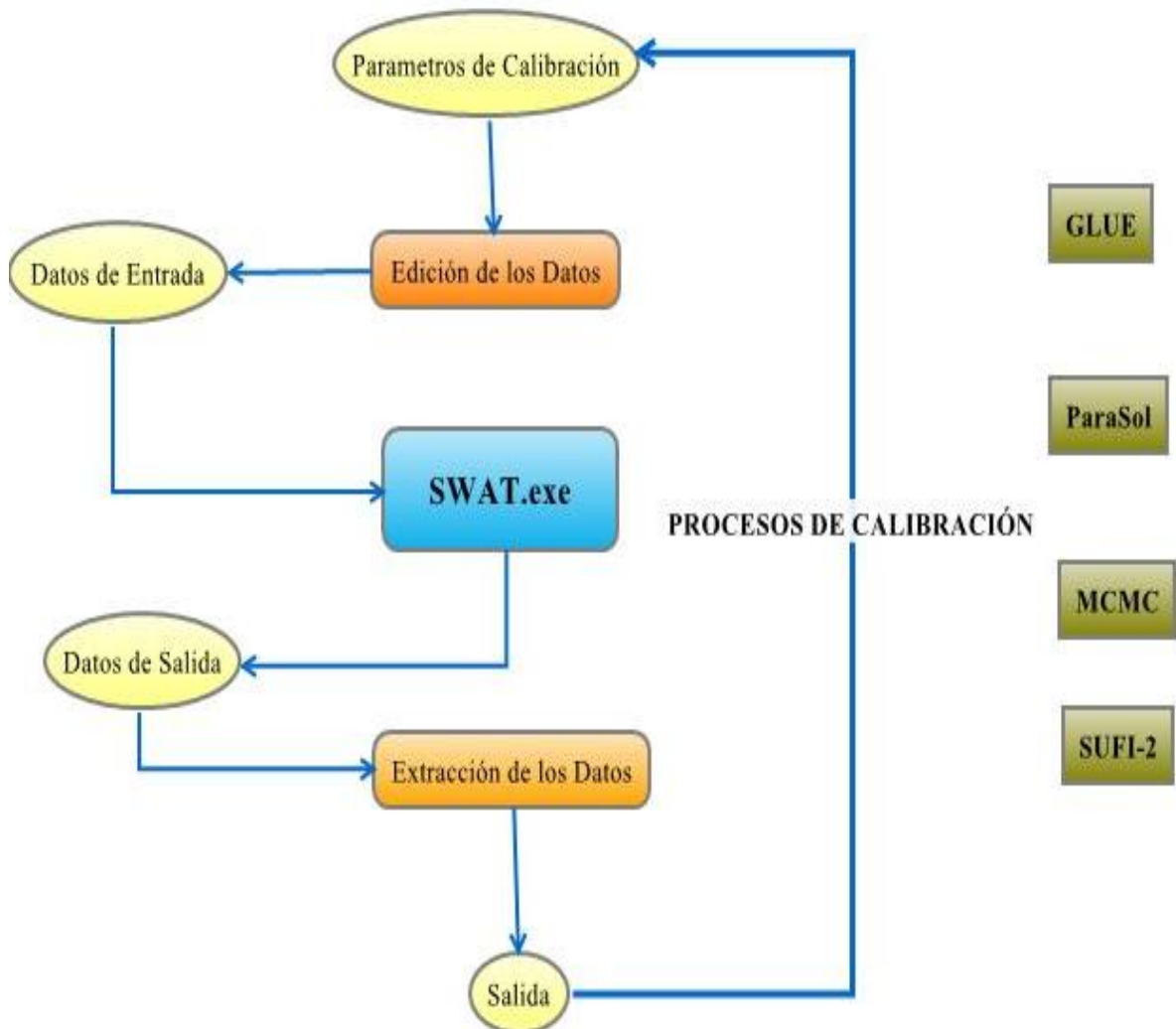
modelación, los datos de entrada que requiere SWAT para el área de estudio incluyen [14] [17]:

- Topografía
- Uso del Suelo
- Tipo de Suelos
- Datos de caudal de ríos y salidas de represas
- Datos sobre la calidad del agua
- Fuentes de contaminación puntuales
- Datos meteorológicos (Precipitación, Temperatura del Aire, Velocidad del Viento, Humedad Relativa y Radiación Solar).

De acuerdo a la variable que se desee analizar, posteriormente es necesario seleccionar los parámetros de calibración. Estos parámetros están agrupados en las categorías de: Clima, Sedimentos, Nutrientes y Procesos del Canal. Una lista detallada de los parámetros de calibración en cada uno de estos componentes aparece en el Anexo A. La calibración puede llevarse a cabo a través de las metodologías: GLUE; ParaSol; SUFI-2; e Interferencia Bayesiana MCMC.

Luego de correr el modelo, el programa arroja los datos de salida relacionados con los valores promedios anuales de los parámetros para cada HRU, la cantidad de Sedimentos y el Resumen de Salida. En el Anexo B se encuentra de manera detallada los datos de salida que arroja el programa. Finalmente, se realiza la Extracción de los datos, en la cual, de acuerdo a la modelación que realice el usuario, éste podrá filtrar la información dependiendo de su requerimiento. En la Grafica 1 se proporciona un esquema de la vinculación entre los procesos de calibración y SWAT.

Gráfica 1. Funcionamiento de SWAT



Fuente: Basada en SWAT CUP

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se describen y discuten los resultados de la revisión de literatura en relación con: i) variables y parámetros de calibración de SWAT; ii) funciones objetivo en SWAT, iii) metodologías de calibración; iv) aplicación de las metodologías de calibración; v) ventajas y desventajas de las metodologías; vi) metodología con mayor potencial de aplicación en la cuenca del Suratá.

3.1 VARIABLES Y PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN EN EL MODELO SWAT

De acuerdo a los todos los artículos analizados se encontraron cuatro variables sensibles a la calibración del modelo SWAT, y de acuerdo a estas variables hay diferentes parámetros. Un resumen detallado de las variables y los parámetros de calibración se encuentra en la Tabla 1. En el Anexo C están las definiciones de cada uno de los parámetros sintetizados en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de Calibración del modelo SWAT

VARIABLES DE CALIBRACIÓN	PARÁMETROS DE LA CALIBRACIÓN
Balance y	<i>Número de Curva</i>
	<i>Humedad aprovechable del Suelo</i>
	<i>Factor de compensación de la Evaporación del Suelo</i>
	<i>Propiedades del Suelo</i>
	<i>Parámetros de Agua Subterránea</i>
Producción de	<i>Coefficientes revap (coeficientes asociados al movimiento del agua desde el acuífero superficial hasta la zona insaturada).</i>
	<i>Agua aprovechable</i>
Agua	<i>Rutina de decrecimiento del cultivo</i>
	<i>Densidad aparente del Suelo</i>
	<i>Factor de compensación del consumo de la planta</i>
	<i>Conductividad hidráulica del suelo</i>
Sedimentos	<i>Factor de ajuste del caudal Pico</i>
	<i>Coefficiente de Rugosidad de Manning para el canal principal</i>
	<i>Longitud promedio de la pendiente</i>
	<i>Erosionabilidad del suelo</i>
	<i>Cobertura del canal</i>

VARIABLES DE CALIBRACIÓN	PARÁMETROS DE LA CALIBRACIÓN
	<i>Parámetros para el cálculo de las cargas de Sedimentos</i>
	<i>Parámetro lineal para calcular la cantidad máxima de sedimentos que puede ser re-entrado durante el tránsito de sedimentos</i>
	<i>Pendiente de las laderas</i>
	<i>Erosión del canal</i>
	<i>Parámetro exponencial para calcular la cantidad máxima de sedimentos que puede ser re-entrado durante el tránsito de sedimentos</i>
	<i>Coefficiente de rugosidad de Manning para los canales tributarios</i>
Transporte de fósforo	<i>Fracción de la porosidad para excluir aniones</i>
	<i>Coefficiente de Percolación del fósforo</i>
	<i>Parámetro de distribución de consumo de fósforo</i>
	<i>Fracción de enriquecimiento de fósforo en los sedimentos</i>
	<i>Índice de disponibilidad de fósforo</i>
	<i>Coefficiente de partición de fósforo en el suelo</i>
	<i>Concentración inicial de fósforo en el suelo</i>
<i>Densidad aparente</i>	
Transporte de nitrógeno	<i>Factor de mineralización del humus.</i>
	<i>Coefficiente de percolación del nitrógeno.</i>
	<i>Concentración inicial del nitrógeno en el suelo</i>

3.2 DEFINICIÓN DE LA FUNCIÓN OBJETIVO

Los parámetros de calibración están condicionados de acuerdo a la selección de la función objetivo, el número de datos y la metodología de calibración. Existen diez funciones objetivo pero las más utilizadas en las diferentes metodologías de calibración son [15]: i) el Coeficiente de Nash- Sutcliffe (NS ó NSE) y ii) el Coeficiente de Determinación R².

3.2.1 Coeficiente de Nash Sutcliffe. El coeficiente de Nash Sutcliffe es una estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual ("ruido") en comparación con la variación de datos de medida ("información") [16]. Se puede expresar como:

$$NS = 1 - \frac{\sum_i (Q_m - \bar{Q}_s)_i^2}{\sum_i (Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2}$$

Dónde: **NS** es el Coeficiente de Eficiencia, **Q** es una variable, **m** y **s** representan la medición y la simulación, y la barra representa la media

3.2.2 Coeficiente de Determinación R². De acuerdo con Bravais Pearson, el coeficiente de determinación se define como el valor cuadrado del coeficiente de correlación [18]. Se puede expresar como:

$$R^2 = \frac{[\sum_i(Q_{m,i} - \bar{Q}_m)(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)]^2}{\sum_i(Q_{m,i} - \bar{Q}_m)^2 \sum_i(Q_{s,i} - \bar{Q}_s)^2}$$

Dónde: **R²** es el Coeficiente de Determinación, **Q** es una variable, **m** y **s** representan la medición y la simulación, **i** representa al número de datos simulados.

3.3. METODOLOGIAS DE CALIBRACIÓN

En seguida se presenta una descripción de cada metodología de calibración revisada y el proceso que se debe llevar a cabo para la calibración del modelo SWAT en cada una de estas metodologías.

3.3.1 Metodología: Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE):

La metodología Glue acepta a diferentes conjuntos de parámetros que producen predicciones ajustadas al modelo. A este criterio se le conoce con el nombre de equifinalidad [19]. El objetivo de la metodología Glue es reconocer el conjunto de modelos dentro de las posibles combinaciones de los parámetros. El proceso de Glue se divide en las siguientes etapas [20]:

Etapas 1: La función objetivo ya está definida. NSE es la función objetivo más popular utilizada en la metodología Glue.

Etapa 2: Cada parámetro de calibración se comporta de acuerdo a la siguiente probabilidad:

$$W_1 = \frac{L(\theta_i)}{\sum_{k=1}^N L(\theta_k)}$$

Donde N es el número de conjuntos de parámetros de comportamiento, y $L(\theta_i)$ es la medida de probabilidad generalizada.

Etapa 3: Los intervalos de parámetros se asignan de acuerdo con el significado físico y la comprensión actual de los parámetros, y luego se aplican al esquema de muestreo aleatorio de Monte Carlo. Como hay poca información antes de la distribución de los parámetros, ésta se asume como uniforme.

Etapa 4: Se realiza el análisis de modelos de incertidumbre de los parámetros. Los conjuntos de parámetros seleccionados aleatoriamente serán utilizados como los parámetros de entrada para el modelo SWAT.

Etapa 5: Para la medida de probabilidad se usa el NSE, éste es utilizado en el programa GLUE06:

$$NSE = \frac{\sum_{t_i}^n (y_{t_i}^M(\theta) - y_{t_i})^2}{\sum_{t_i}^n (y_{t_i} - y_{pr})^2}$$

Donde n es el número de datos observados y y_{t_i} , $y_{t_i}^M(\theta)$ representan la observación y la simulación con el parámetro θ en el tiempo t_i y y_{pr} es el promedio de los valores observados.

3.3.2 Metodología: Parameter Solution (ParaSol). El método ParaSol es la combinación de un método de optimización global llamado método aleatorio de evolución compleja SCE (que está basado en un algoritmo genérico especialmente diseñado para lidiar con las características encontradas en la

cuenca) y el análisis de incertidumbre UA como procedimiento de optimización automática, llamado SCE UA [21]. SCE UA es un algoritmo de búsqueda global para la minimización de una función única para la obtención de 16 parámetros, también analiza la incertidumbre y puede encontrar soluciones óptimas. El proceso con Parasol se divide en dos etapas:

Etapa 1: Después de la aplicación del algoritmo SCE UA, las simulaciones realizadas son divididas en buenas y no buenas por un límite, en este paso se parece a la metodología de GLUE. Por lo tanto, la predicción de incertidumbre está siendo construida igualmente por las simulaciones buenas. El límite del valor puede ser definido por la estadística de Chi2, donde se selecciona la simulación correspondiente a la región de confianza (CR) o las estadísticas Bayesianas que son capaces de señalar la región de probabilidad alta (HPD) para los parámetros o los datos de salida del modelo.

Etapa 2: La función objetivo utilizada para esta metodología es la suma de los cuadrados de los residuos (SSQ):

$$SSQ = \sum_{t_i=1}^n (y_{t_i}^M(\boldsymbol{\theta}) - y_{t_i})^2$$

Donde n es el número de datos observados y y_{t_i} , $y_{t_i}^M(\boldsymbol{\theta})$ representan la observación y la simulación con el parámetro $\boldsymbol{\theta}$ en el tiempo t_i .

3.3.3 Metodología: Bayesian Inference Markov Chain Monte Carlo (MCMC).

MCMC es una de las técnicas numéricas más importantes para la creación de una muestra de la distribución posterior, que ha sido ampliamente utilizada en la modelización hidrológica para cuantificar incertidumbres de los parámetros [22]. Su fundamento subyacente es la creación de una cadena de Markov para simular la verdadera distribución posterior mediante la generación de muestras aleatorias. Una ventaja de este método es que no requiere supuestos de linealidad

en el modelo o incluso que los resultados del modelo no tienen por qué ser diferenciables con respecto a los valores de los parámetros [23]. Debido a su robusto rendimiento, MCMC se utiliza frecuentemente para evaluar incertidumbres de los parámetros en combinación con inferencia bayesiana mediante la estimación de una densidad de probabilidad para los parámetros del modelo acondicionado en observaciones.

Los métodos MCMC en SWAT CUP (Procedimientos de calibración de incertidumbre de SWAT) se basan en las investigaciones desarrolladas por Peter Reichert, llamado UNCSIM. Éste es un paquete de programas para la inferencia estadística y la sensibilidad, la identificabilidad y análisis de incertidumbre. Además UNCSIM apoya la estimación de parámetros de los resultados del modelo, así como la estimación de la distribución bayesiana posterior. Puede ser descargado libremente desde <http://www.uncsim.eawag.ch>. Su procedimiento se divide en las siguientes etapas [24]:

Etapas 1: La rutina de análisis de sistemas. Aquí se escriben los nombres y valores de los parámetros en formato de texto en el archivo "model.in".

Etapas 2. A continuación, el análisis de sistemas llama al programa "Programa de señal externa" para leer los valores de los parámetros de simulación del archivo "model.in" y escribir los resultados en otro archivo de texto "model.out".

Etapas 3 Por último, el análisis de sistemas lee los resultados del Programa desde el archivo "model.out" los procesa y hace una llamada siguiente hasta que termina la operación.

3.3.4 Metodología Sequential Uncertainty Fitting 2 (SUFI-2). La metodología SUFI-2 comienza asumiendo valores altos de incertidumbre (dentro de una gama significativa) de modo que los datos medidos inicialmente están en el intervalo de

confianza del 95% 95PPU. Posteriormente la incertidumbre va disminuyendo con el control del factor P y el factor R [15]. La actualización de los parámetros se realiza mediante el cálculo de la matriz de sensibilidad, seguida por el cálculo de la matriz de covarianza, la matriz de correlación y el 95% de los intervalos de confianza de los parámetros. En cada actualización de los parámetros los nuevos rangos siempre serán más pequeños que los anteriores [25]. Las etapas que se siguen en el análisis de SUFI-2 se describen a continuación [15], [25], [26], [27]:

Etapas 1: Se establecen la función objetivo y los rangos iniciales de los parámetros [b j, min, b j, máx]. Las funciones objetivo más populares son el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) y el coeficiente de determinación (R^2) [28]. Los rangos de parámetros razonables se obtienen generalmente de conocimientos y referencias de expertos.

Etapas 2: Se emplea el método del **Hipercubo Latino** (Latin Hypercube) [29] de los parámetros que conduce a n combinaciones de parámetros, donde n es el número de iteraciones de la simulación requerida. Los conjuntos de parámetros incluidos en la muestra se utilizan como parámetros de entrada de simulaciones SWAT.

Etapas 3: Se calcula el 95PPU para todos los parámetros simulados a través de la función objetivo. En esta evaluación se calculan las Medidas de incertidumbre como el porcentaje P (datos definidos por la banda 95PPU), y el grado de incertidumbre determinado a partir de:

$$d = \frac{1}{k} \sum_{l=1}^k (q_{upper} - q_{lower})_l$$

Donde, d es la distancia media, l es una iteración, q es una variable de calibración, k es el número de puntos de datos observados de la variable q . Y d es un cálculo del *factor R*:

$$R = \frac{\partial x}{\sigma_x}$$

Donde, σ_x es la desviación estándar de la variable observada x . Un valor menor que 1 es una medida deseable que el R -factor.

El porcentaje P se deriva de:
$$P = \frac{nq_{in}}{N} * 100\%$$

Donde, N es el número total de valores observados, nq_{in} es el número de los datos observados en el intervalo de confianza del 95% (95PPU). La combinación razonable de los diferentes factores tiene que ser determinada para el parámetro adecuado que oscila en la siguiente iteración.

Etapa 4: Si no se cumplen los criterios, se realizan más rondas de muestreo para actualizar intervalos de parámetros y se calcula mediante el método del Hipercubo Latino:

$$b'_{j,\min(new)} = b_{j,lower} - \text{Max} \left[\frac{b_{j,lower} - b_{j,\min}}{2}, \frac{b_{j,max} - b_{j,upper}}{2} \right]$$

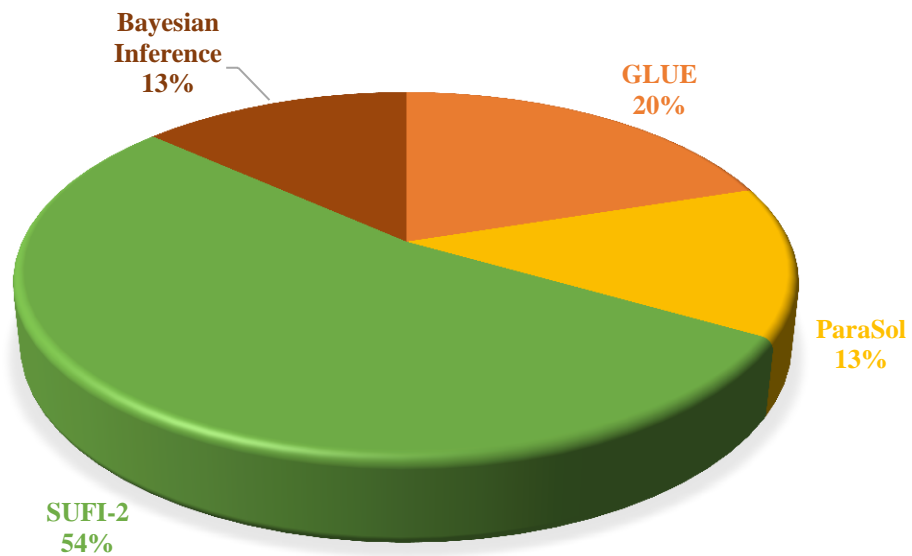
$$b'_{j,\max(new)} = b_{j,upper} + \text{Max} \left[\frac{b_{j,lower} - b_{j,\min}}{2}, \frac{b_{j,max} - b_{j,upper}}{2} \right]$$

Donde b' corresponde a la nueva gama después de la siguiente iteración. Como las ecuaciones anteriores solo garantizan que los intervalos de parámetros actualizados siempre se centren en las mejores estimaciones se pueden afectar algunos parámetros. Por lo tanto, se requiere un ajuste manual para evitar el mal uso de valores razonables de acuerdo con la información previa de parámetros.

3.4. APLICACIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DE CALIBRACIÓN

La calibración de los modelos hidrológicos de una cuenca no es una tarea fácil debido a las diferentes metodologías que existen en la actualidad. Mediante la revisión de literatura se encontraron 15 artículos de los cuales se referenciaron 10 artículos, en los que se reportaba la aplicación del modelo SWAT y en especial su calibración. La revisión de literatura ayudó a identificar las cuatro metodologías de calibración más comunes: Bayesian Inference, Glue, Parasol, y SUFI-2, y que, entre estas, la metodología de calibración más usada es la SEQUENTIAL UNCERTAINTY FITTING 2 (SUFI-2) (Gráfica 2).

Gráfica 2. Metodologías de Calibración usadas en la literatura revisada:



Fuente: Elaboración Propia

Se realizó una síntesis de los artículos revisados como se muestra en la Tabla 2. La síntesis detalla características como: área de estudio, clima, temperatura, suelo, usos del suelo, metodología de calibración y parámetros calibrados. En esta revisión se observó la implementación y demostración del modelo SWAT en

diferentes partes del mundo tales como China, Suiza, Canadá, Túnez, Irán, Laos, Etiopía y el Oeste Africano. Estos estudios se realizaron en diferentes tipos de clima, con sus respectivas temperaturas, que van desde -15°C hasta 38°C. En la característica “Suelos” de la Cuenca, un área de estudio mostró 35 perfiles diferentes del suelo mientras que en el resto de las áreas de estudio solo presentan entre 2 y 4 perfiles de suelo; el 77.7% de las áreas de estudio utilizan el suelo para la agricultura. En el hemisferio norte se aplicaron las distintas metodologías de calibración. La mayoría de las áreas de estudio se preocuparon por analizar ciertos parámetros de las variables de calibración: i) *Balance y Producción de Agua* y ii) *Sedimentos*. El Anexo D incluye una síntesis detallada de los artículos de investigación que aplican metodologías de calibración del modelo SWAT.

Tabla 2. Características de las cuencas donde se han realizado estudios que aplican las metodologías de calibración y parámetros calibrados

Área De Estudio	Clima	Temperatura	Suelo	Uso Del Suelo	Metodología de Calibración	Parámetros Calibrados ³	Autor
Cuenca Chaohe, Norte de China	Templado Continental y Semiárido	Máx.: 6.2 ° C Mín.: 0.9 ° C	35 perfiles de Suelos	Bosques (49.5%), Pastizales (27.3%), Tierras agrícolas (21.3%)	BAYESIAN INFERENCE WITH MODEL MCMC	Escorrentía Superficial, Ciclo hidrológico, Agua del Suelo, Agua subterránea, Tiempo de Concentración, Enrutamiento	Yang et al. 2007
Cuenca Thur Noreste de Suiza	Caracterizado por Temporadas de inviernos moderados y fríos y Temporadas de Verano	En verano: 10 ° C a 25 ° C En invierno: -15 ° C a 7 ° C	Depósitos de Grava y Arena	Agricultura (60%), Bosques (30%), Zonas urbanas (10%), Tierras estériles, Aguas superficiales	SUFI-2	Procesos de Nieve, Agua Subterránea, Escorrentía Superficial, Tiempo de Concentración, Agua del Suelo, Ciclo hidrológico, Ciclo del Fósforo, Enrutamiento, Calidad de la Corriente del Agua, Ciclo del Nitrógeno, Erosión	Karim C. Abbaspour et al. 2007
Subcuenca del lago Harp, Centro Sur de Canadá	Frio	Máx.: 18.4 ° C Mín.: -10.5 ° C	Franco Arenoso y Arena arcillosa	Mixto caducifolio (75%), Bosque de coníferas, Lago (15%), Humedales (10%), Estanques	GLUE	Ciclo Hidrológico, Agua Subterránea, Agua del Suelo, Escorrentía Superficial, Ciclo del Nitrógeno, Erosión	D. Zhang, Chen, and Yao 2016
Cuenca Joumine, Túnez	Subhúmedo y semiárido	Máx.: 23 ° C Mín.: 8 ° C	Arcilla arenosa, franco arcilla, arena arcillosa,	Agricultura (80%), Pastizales	ParaSol	Agua Subterránea, Escorrentía Superficial,	Aouissi et al. 2016

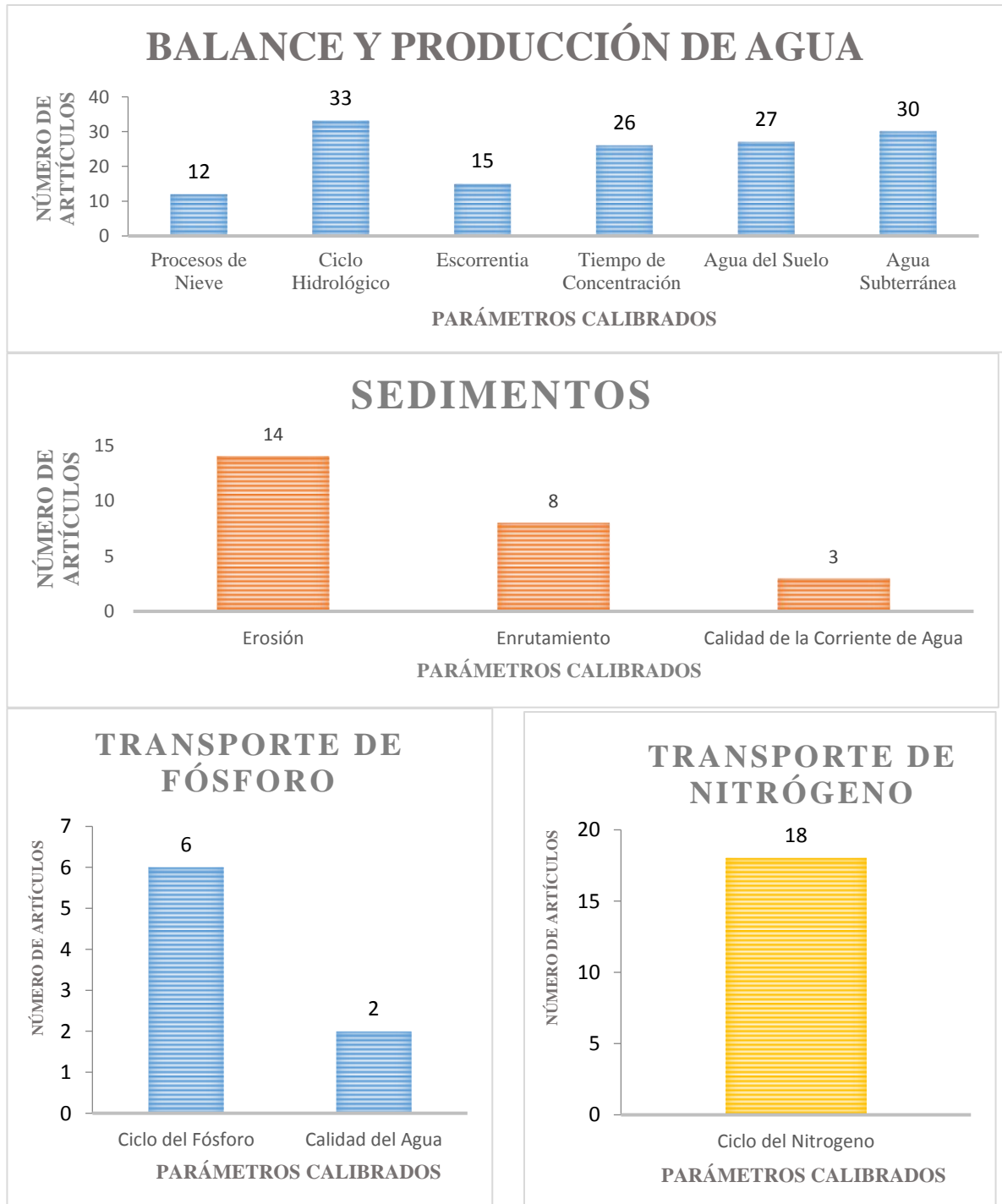
³ Los Parámetros Calibrados están configurados por Tipos. Ésta Configuración detallada se encuentra en el Anexo A.

Área De Estudio	Clima	Temperatura	Suelo	Uso Del Suelo	Metodología de Calibración	Parámetros Calibrados ³	Autor
			arcilla	(10%), Depósitos (5%) Plantaciones de flores (5%)		Enrutamiento, Ciclo hidrológico, Agua del Suelo.	
Cuenca de Hamadan Bahar, Irán	Semiárido	Promedio: 11.3 ° C	Franco arcilloso, franco arenoso	Predomina la agricultura (sus cultivos principales son el trigo y la patata)	SUFI-2	Escorrentía Superficial, Procesos de Nieve, Tiempo de concentración Agua subterránea, Ciclo del suelo, Ciclo del Nitrógeno, Ciclo del Fósforo	Akhavan et al. 2010
Cuenca del Rio Daning, China	Monzónico (zona norte subtropical)	Máx.: 38 ° C Mín.: 4 ° C	Suelo marrón amarillo(marga arena) y purpura (arena arcillosa)	Bosques, Tierra de cultivos Pastos	GLUE	Ciclo del Nitrógeno, Ciclo del Fósforo, Calidad del Agua, Calidad de la corriente de Agua	Gong et al. 2011
Yingloxia, Noroeste de China	Caracterizado por veranos intensos e inviernos fríos	Máx.: 20 ° C Mín.: -12 ° C	Prado alpino 49%, heladas del desierto 15% y el reto suelo castaño	Pastizal (50 %), Matorrales	BAYESIAN INFERENCE WITH MODEL MCMC	Escorrentía Superficial, Agua del Suelo, Procesos de Nieve, Agua Subterránea	Li et al. 2010
Cuenca del rio Xedone, Lao PDR	Caracterizado por 2 estaciones: una lluviosa (mayo a octubre) y seca (noviembre a abril)	Máx.: 34.8 ° C Mín.: 18° C	Suelo Arenoso arcilloso, arcilla y grava	Árboles de hoja caduca, Verduras (46,16%), Tierra agrícola (14.19%), Campo de arroz (17.08%), Arbustos (21.21%), Pastos (1.16%), Superficie del Agua (0.02%), Área urbana	SUFI-2	Escorrentía superficial, Agua Subterránea, Ciclo Hidrológico Tiempo de Concentración, Agua del Suelo	Vilaysane et al. 2015

Área De Estudio	Clima	Temperatura	Suelo	Uso Del Suelo	Metodología de Calibración	Parámetros Calibrados ³	Autor
				(0.18%)			
Cuencas de Maybar, Noreste de Etiopía	Cálido y Húmedo	Máx.: 30 ° C Mín.: 13° C	Suelos franco arcillosos, franco arcillosos, arenosos,	Hierba (59.78%), Tierras Agrícolas (30.75%), Tierra en barbecho (6.82%) Plantaciones (2.65%),	SUFI-2	Agua del Suelo, Erosión, Enrutamiento.	Yesuf et al. 2015
Oeste africano	Ecuatorial, tropical húmedo tropical seco	Mayores a 25 ° C y menores a 12 ° C	Suelos franco arenosos y franco arcillo arenoso. Marga	Sabana (56.8%), Escasa Vegetación (15.9%), Pradera (13.5%), Matorrales (6.6%), Bosques (4.5%), Bosques Verdes (2.3%), Tierras de Cultivo (0.4%), Pasto	SUFI-2	Escorrentía Superficial, Agua del Suelo, Agua Subterráneas, Ciclo Hidrológico, Enrutamiento	Schuol et al. 2008

En la Gráfica 3 se presentan las variables sensibles a la calibración y los respectivos parámetros reportados en los diferentes artículos analizados. En la variable “Balance y Producción de Agua” el 62.93% de los parámetros analizados corresponden al Ciclo Hidrológico, el Agua Subterránea y el Agua del Suelo; el 56% de los parámetros de la variable “Sedimentos” se relacionan con la Erosión; en la variable “Transporte del Fósforo” el 75% de los parámetros corresponden al Ciclo del Fósforo.

Gráfica 3. Variables de Calibración de acuerdo a la Síntesis



Fuente: Elaboración Propia

3.5. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LAS METODOLOGÍAS DE CALIBRACIÓN

Algunos de los estudios revisados compararon el desempeño de las metodologías de calibración y plantearon las ventajas y desventajas de la implementación de éstas.

Las ventajas, las desventajas y los criterios de calibración reportados por la literatura se presentan en la Tabla 3 y Tabla 4, la información detallada sobre los estudios se encuentra en el Anexo E.

Tabla 3. Ventajas y Desventajas de las Metodologías de calibración

METODOLOGÍA	VENTAJAS	DESVENTAJAS
GLUE	<input type="checkbox"/> Todas las fuentes de incertidumbre están descritas por los parámetros	<input type="checkbox"/> Las fuentes de error se transfieren a la asociación del conjunto de parámetros con el valor de medida de probabilidad.
ParaSol	<input type="checkbox"/> Es fácil de implementar.	<input type="checkbox"/> Solo tiene un parámetro de incertidumbre.
BAYESIAN INFERENCE WITH MODEL MCMC	<input type="checkbox"/> Los parámetros se miden a partir de las características de la cuenca	<input type="checkbox"/> Es muy complicado de implementar, por el modelo de calibración. <input type="checkbox"/> No tiene en cuenta la correlación de los parámetros.
SUFI-2	<input type="checkbox"/> Captura la mayor parte de los datos medidos en la predicción de la incertidumbre del 95% (95PPU) del modelo en un solo proceso iterativo. <input type="checkbox"/> A través de la prueba bondad de ajustes compara en dos bandas el 95PPU (la banda de modelación llamada "R-Factor" y la banda de los datos obtenidos llamada "factor P"). <input type="checkbox"/> Permite el uso de las 10 funciones objetivo diferente, tales como r^2 , Nash-Sutcliffe (NS), y el error cuadrático medio (MSE). <input checked="" type="checkbox"/> Requiere un número menor simulaciones para lograr el mismo nivel de rendimiento	<input type="checkbox"/> Se requiere un ajuste manual para evitar el uso de, posiblemente, los valores razonables de acuerdo a la información práctica previa de parámetros.

Fuente: Basado en las Cuencas de los Ríos Thur y Chaohe

Tabla 4. Criterios de Calibración para la aplicación del modelo SWAT

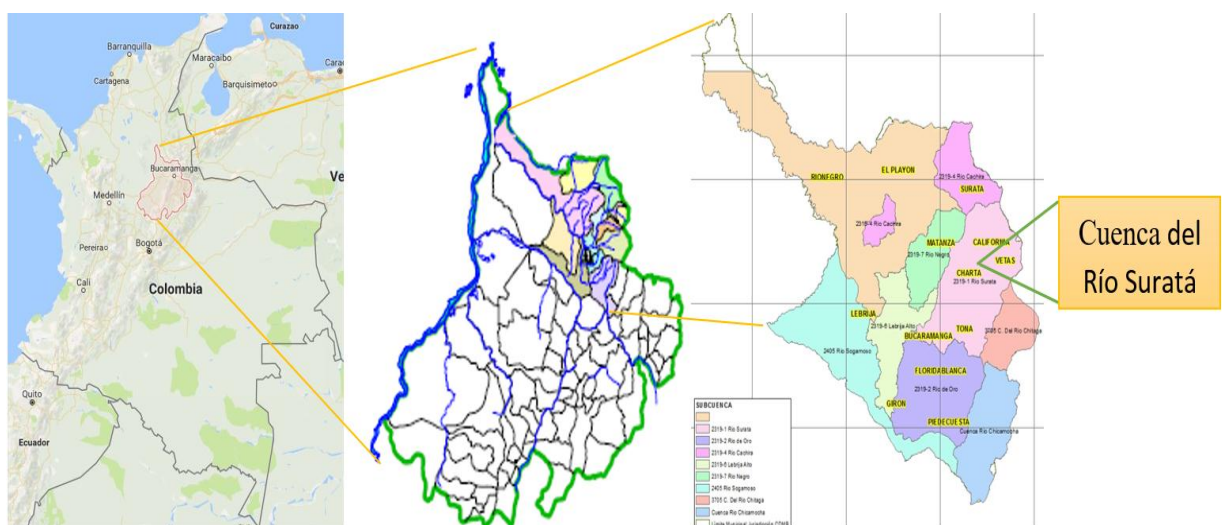
<i>METODOLOGÍA</i>	<i>GLUE</i>	<i>ParaSol</i>	<i>BAYESIAN INFERENCE WITH MODEL MCMC</i>	<i>SUFI-2</i>
<i>CRITERIOS DE CALIBRACIÓN</i>				
Características de la Cuenca			X	X
Indicadores de Calidad del Agua	X	X	X	X
Utilización del Coeficiente de Eficiencia NSE	X		X	X
Utilización del Coeficiente de Determinación R ²	X		X	X
Correlación de Parámetros	X	X		X
La incertidumbre esta descrita por los parámetros	X		X	X
Dificultad de utilización			X	

Fuente: Basada en las cuencas de los Ríos Thur, Chaohe y Wenjing

3.6. PROPUESTA DE LA METODOLOGÍA CON MAYOR POTENCIAL DE APLICACIÓN PARA CALIBRACIÓN DE SWAT EN LA CUENCA DEL RÍO SURATÁ

La cuenca del río Suratá hace parte de la Cuenca superior del Río Lebrija, la cual se encuentra localizada en el sector noroccidente y centro norte del área de Jurisdicción de la CDMB (ver Figura 1).

Figura 1. Localización Geográfica de la Cuenca del Río Suratá

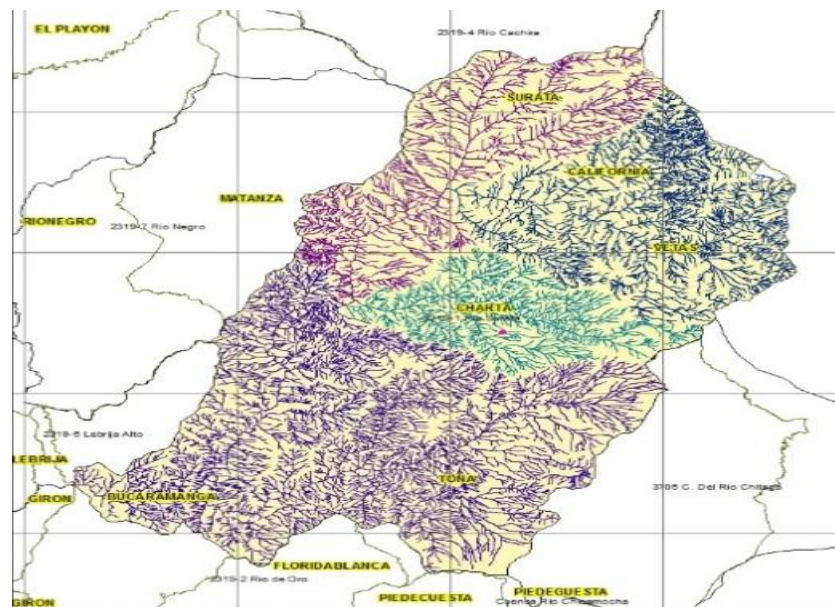


Fuente: CDMB, adaptada por la autora (2016)

La Cuenca del Río Suratá limita (ver figura 2):

- Al sur con las cuencas del Río de Oro y la Cuenca de Lebrija Alto en la entrega de aguas del Río Suratá al Río Lebrija
- Al Occidente con la Cuenca Río negro y la Cuenca Lebrija Alto en la divisoria de aguas de la microcuenca el Aburrido.
- Al Norte con la Cuenca Cáchira del sur y con la Cuenca del Río Chitagá
- Al Oriente con la Cuenca Río de Oro y con la Cuenca del Río Chitagá compartida con el Departamento del Norte de Santander

Figura 2. Límites de la Cuenca del Río Suratá



Fuente: CDMB 2016

En cuanto a la información sobre la cuenca que demanda el modelo SWAT en aspectos como: clima, propiedades del suelo, topografía y vegetación, en la parte alta de la cuenca del río Suratá se pueden encontrar suelos con texturas gruesas con fertilidades bajas; entre la parte alta y media de la cuenca existen superficies

con textura franco, franco finas, franco arenoso, franco arcillosa, franco arcillosa arenosa, franco arcillo limosa, con drenaje natural bueno y fertilidad baja. En la parte baja de la cuenca se pueden encontrar superficies con texturas franco arcillo arenosa, arenosa con gravilla (el mapa de los tipos de suelos lo podemos encontrar en el IGAC a una escala de 1: 100000 (ver Anexo F)). Respecto al uso del suelo, en la cuenca hay 15 tipos de usos entre los cuales se encuentran los bosques naturales, los cultivos, pastos, las zonas de industria y comercio, vegetación (el mapa de los Usos del Suelo lo podemos en PLAN DE ORDENAMIENTO Y MANEJO AMBIENTAL SUBCUENCA RÍO SURATÁ (POMCA) de la CDMB (ver Anexo 7)). En la cuenca, la temperatura se encuentra en el rango de 0°C a 35 °C, y hay presencia de todos los pisos térmicos: cálido, templado, frío y páramo.

Existen casos de estudio donde se comparan la eficacia de cada una de las metodologías de calibración. El caso de Estudio de las siguientes cuencas: La Cuenca del Río Chaohe [26], La cuenca del Río Thur [15] y La Cuenca del Río Wenjing [30]. Estos tres casos de estudio tienen similitudes con la Cuenca del Río Suratá en cuanto al clima, el tipo de suelos y los usos que le dan al suelo.

De acuerdo con la revisión de las metodologías de calibración y las características de la cuenca, se propone que la metodología para la calibración y aplicación del modelo SWAT en la cuenca del Río Suratá sea la metodología SUFI-2, debido a que realiza menos iteraciones para obtener un resultado aceptable. Cada una de estas iteraciones proporciona valores sugeridos para los nuevos parámetros que se utilizarán en la siguiente iteración. Por último, se proporciona el resultado aceptable con valores de los coeficientes de Nash-Sutcliffe y de determinación R^2 .

De acuerdo con la información analizada a partir de lo reportado por los diferentes autores en los estudios revisados, la metodología SUFI-2 tiene una buena precisión (NSE y R^2), la mejor cobertura de la medición (factor P), con

razonablemente pequeños impactos de incertidumbre (factor R), y una mayor eficiencia computacional de los modelos hidrológicos distribuidos complejos. Para la implementación de la metodología de calibración SUFI-2, se puede realizar el proceso ejemplificado en el Anexo H.

4. CONCLUSIONES

A través de la revisión de literatura se identificó que las cuatro metodologías de calibración más usadas para la aplicación del modelo SWAT son: Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE), Parameter Solution (ParaSol), Bayesian Inference with model Markov Chain Monte Carlo (MCMC) y Sequential Uncertainty Fitting (SUFI-2). Así mismo, se identificaron las variables y parámetros sensibles a la calibración del modelo.

Los parámetros calibrados están condicionados por la “Función Objetivo”. En este estudio se identificó que existen dos funciones objetivo de mayor utilización las cuales son: el Coeficiente de Nash- Sutcliffe (NS ó NSE) y el Coeficiente de Determinación R^2 .

Los estudios revisados fueron claves para identificar que la metodología SUFI-2 es la metodología con mayor aplicabilidad en la Cuenca del Río Suratá porque genera buenos resultados en la modelación de diferentes parámetros con menos iteraciones y es la utilizada con mayor frecuencia en los estudios de modelación con SWAT.

Los resultados de esta revisión sirven para la construcción de un modelo hidrológico calibrado con la herramienta SWAT que contribuya a diseñar programas de descontaminación y planificación de uso del suelo, que se deben implementar en la cuenca del Río Surata por parte de entidades como la CDMB, para mejorar su estado.

Al momento de implementar la metodología de calibración SUFI-2 en el río Suratá se deberá tener en cuenta que las funciones objetivo que más se aproximan a la realidad son: los coeficientes de Eficiencia (NS) y de Determinación (R^2); el ajuste

manual para evitar valores alejados de la realidad; y que la información sobre las características de la cuenca que se debe alimentar al modelo esté lo más detallada posible y que se encuentre en el mismo formato que requiere el software SWAT, para que el proceso de modelamiento se desarrolle de manera eficaz y se obtengan resultados confiables que sirvan de insumo para la toma de decisiones.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] P. W. Gassman, M. R. Reyes, C. H. Green, and J. G. Arnold, "The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions," *Trans. Asabe*, vol. 50, no. 4, pp. 1211–1250, 2007.
- [2] W. KL and C. I, "Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable SWAT model," *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.*, pp. 1077–1089, 2005.
- [3] G. Pangare, "The Source of the Problem," *Nature*, vol. 441, p. 28, 2006.
- [4] N. Funke, S. H. H. Oelofse, J. Hattingh, P. J. Ashton, and A. R. Turton, "IWRM in developing countries: Lessons from the Mhlatusze Catchment in South Africa," *Phys. Chem. Earth*, vol. 32, no. 15–18, pp. 1237–1245, 2007.
- [5] J. Ordóñez, "¿ Qué Es Cuenca Hidrológica ?," *Soc. Geológica Lima*, vol. 1, pp. 1 – 44, 2011.
- [6] W. Jiao, W. Ouyang, F. Hao, H. Huang, Y. Shan, and X. Geng, "Combine the soil water assessment tool (SWAT) with sediment geochemistry to evaluate diffuse heavy metal loadings at watershed scale.," *J. Hazard. Mater.*, vol. 280, pp. 252–9, Sep. 2014.
- [7] Cdmb, "Plan De Ordenamiento Y Manejo Ambiental Subcuenca Rio Surata," p. 43, 2006.
- [8] J. E. Holguin-Gonzalez, P. Boets, A. Alvarado, F. Cisneros, M. C. Carrasco, G. Wyseure, I. Nopens, and P. L. M. Goethals, "Integrating hydraulic, physicochemical and ecological models to assess the effectiveness of water quality management strategies for the River Cuenca in Ecuador," *Ecol. Modell.*, vol. 254, pp. 1–14, Apr. 2013.
- [9] B. Lin, X. Chen, H. Yao, Y. Chen, M. Liu, L. Gao, and A. James, "Analyses of landuse change impacts on catchment runoff using different time indicators based on SWAT model," *Ecol. Indic.*, vol. 58, pp. 55–63, Nov. 2015.
- [10] S. B. Dessu and A. M. Melesse, "Modelling the rainfall-runoff process of the Mara River basin using the Soil and Water Assessment Tool," *Hydrol.*

- Process.*, vol. 26, no. 26, pp. 4038–4049, Dec. 2012.
- [11] X. Wang, S. Shang, W. Yang, and A. M. Melesse, “Simulation of an agricultural watershed using an improved curve number method in swat,” *Trans. ASABE*, vol. 51, no. 4, pp. 1323–1339, 2008.
- [12] S. G. Setegn, R. Srinivasan, B. Dargahi, and A. M. Melesse, “Spatial delineation of soil erosion vulnerability in the Lake Tana Basin, Ethiopia,” *Hydrol. Process.*, vol. 23, no. 26, p. n/a–n/a, 2009.
- [13] M. B. Ercan, J. L. Goodall, A. M. Castronova, M. Humphrey, and N. Beekwilder, “Calibration of SWAT models using the cloud,” *Environ. Model. Softw.*, vol. 62, pp. 188–196, Dec. 2014.
- [14] H. M. Yesuf, M. Assen, T. Alamirew, and A. M. Melesse, “Modeling of sediment yield in Maybar gauged watershed using SWAT, northeast Ethiopia,” *CATENA*, vol. 127, pp. 191–205, Apr. 2015.
- [15] K. C. Abbaspour, “SWAT - CUP SWATCalibration and Uncertainty Programs,” 2011.
- [16] J. E. Nash and J. V. Sutcliffe, “River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles,” *Hydrology*, vol. 10, pp. 282–290, 1970.
- [17] K. C. Abbaspour, E. Rouholahnejad, S. Vaghefi, R. Srinivasan, H. Yang, and B. Kløve, “A Continental-Scale Hydrology and Water Quality Model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model,” *J. Hydrol.*, vol. 524, pp. 733–752, Mar. 2015.
- [18] P. Krause and D. P. Boyle, “Advances in Geosciences Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment,” *Adv. Geosci.*, vol. 5, no. 89, pp. 89–97, 2005.
- [19] R. S. Blasone, J. A. Vrugt, H. Madsen, D. Rosbjerg, B. A. Robinson, and G. A. Zyvoloski, “Generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) using adaptive Markov Chain Monte Carlo sampling,” *Adv. Water Resour.*, vol. 31, no. 4, pp. 630–648, 2008.
- [20] S. Bastola, C. Murphy, and J. Sweeney, “The role of hydrological modelling

- uncertainties in climate change impact assessments of Irish river catchments,” *Adv. Water Resour.*, vol. 34, no. 5, pp. 562–576, May 2011.
- [21] A. Griensven, A. Francos, and W. Bauwens, “Sensitivity analysis and autocalibration of an integral dynamic model for a river water quality,” *water Sci. Technol.*, pp. 321 – 328, 2002.
- [22] G. Kuczera and E. Parent, “Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm,” *J. Hydrol.*, vol. 211, no. 1–4, pp. 69–85, Nov. 1998.
- [23] M. Gallagher and J. Doherty, “Parameter estimation and uncertainty analysis for a watershed model,” *Environ. Model. Softw.*, pp. 1000 – 1020, 2007.
- [24] P. Reichert, “Sensitivity, Identifiability, and Uncertainty Analysis,” 2005.
- [25] K. C. Abbaspour, J. Yang, I. Maximov, R. Siber, K. Bogner, J. Mieleitner, J. Zobrist, and R. Srinivasan, “Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT,” *J. Hydrol.*, vol. 333, no. 2–4, pp. 413–430, 2007.
- [26] J. Yang, P. Reichert, K. C. Abbaspour, J. Xia, and H. Yang, “Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China,” *J. Hydrol.*, vol. 358, no. 1–2, pp. 1–23, 2008.
- [27] C. Xue, B. Chen, and H. Wu, “Parameter Uncertainty Analysis of Surface Flow and Sediment Yield in the Huolin Basin, China,” *J. Hy[1] C. Xue, B. Chen, H. Wu, “param. Uncertain. Anal. Surf. Flow Sediment Yield Huolin Basin, China,” J. Hydrol. Eng., vol. 18, no. 7, pp. 746–759, 2013. drologic Eng., vol. 18, no. 7, pp. 746–759, 2013.*
- [28] D. R. Legates and G. J. McCabe, “Evaluating the use of ‘goodness-of-fit’ Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation,” *Water Resour. Res.*, vol. 35, no. 1, pp. 233–241, Jan. 1999.
- [29] M. D. McKay, R. J. Beckman, and W. J. Conover, “Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code,” *Technometrics*, vol. 21, no. 2, pp. 239–245, May 1979.

- [30] H. Wu and B. Chen, "Evaluating uncertainty estimates in distributed hydrological modeling for the Wenjing River watershed in China by GLUE, SUFI-2, and ParaSol methods," *Ecol. Eng.*, vol. 76, pp. 110–121, Mar. 2015.
- [31] J. G. Arnold, J. R. Kiniry, R. Srinivasan, J. R. Williams, E. B. Haney, and S. L. Neitsch, "CHAPTER 4 SWAT Input Data: .bsn," *SWAT Input/Output File Doc. Version 2012*, 2012.
- [32] J. G. Arnold, J. R. Kiniry, R. Srinivasan, J. R. Williams, E. B. Haney, and S. L. Neitsch, "CHAPTER 5 SWAT Input Data: .sub," *SWAT Input/Output File Doc. Version 2012*, 2012.
- [33] J. G. Arnold, J. R. Kiniry, R. Srinivasan, J. R. Williams, E. B. Haney, and S. L. Neitsch, "CHAPTER 14 SWAT Input Data: crop.dat," *SWAT Input/Output File Doc. Version 2012*, pp. 187–212, 2012.
- [34] J. G. Arnold, J. R. Kiniry, R. Srinivasan, J. R. Williams, E. B. Haney, and S. L. Neitsch, "CHapter 19 Swat INput DAta: .hru," *SWAT Input/Output File Doc. Version 2012*, pp. 231–242, 2012.
- [35] J. G. Arnold, J. R. Kiniry, R. Srinivasan, J. R. Williams, E. B. Haney, and S. L. Neitsch, "Chapter 22 SWAT Input Data: .Sol," *SWAT Input/Output File Doc. Version 2012*.
- [36] J. G. Arnold, J. R. Kiniry, R. Srinivasan, J. R. Williams, E. B. Haney, and S. L. Neitsch, "CH26 Swat Input Data: .Wwq," *SWAT Input/Output File Doc. Version 2012*, pp. 345–352, 2012.
- [37] J. G. Arnold, J. R. Kiniry, R. Srinivasan, J. R. Williams, E. B. Haney, and S. L. Neitsch, "CH27 Swat Input Data: .Swq," *SWAT Input/Output File Doc. Version 2012*, pp. 353–366, 2012.
- [38] J. G. Arnold, J. R. Kiniry, R. Srinivasan, J. R. Williams, E. B. Haney, and S. L. Neitsch, "CHAPTER 32 SWAT OUTPUT DATA: PRIMARY OUTPUT FILES," *SWAT Input/Output File Doc. Version 2012*, no. Chapter 3, 2012.
- [39] J. Yang, P. Reichert, K. C. Abbaspour, and H. Yang, "Hydrological modelling of the Chaohe Basin in China: Statistical model formulation and Bayesian inference," *J. Hydrol.*, vol. 340, no. 3–4, pp. 167–182, Jul. 2007.

- [40] D. Zhang, X. Chen, and H. Yao, "SWAT-CS(enm): Enhancing SWAT nitrate module for a Canadian Shield catchment.," *Sci. Total Environ.*, vol. 550, pp. 598–610, Apr. 2016.
- [41] J. Aouissi, S. Benabdallah, Z. Lili Chabaâne, and C. Cudennec, "Evaluation of potential evapotranspiration assessment methods for hydrological modelling with SWAT—Application in data-scarce rural Tunisia," *Agric. Water Manag.*, Mar. 2016.
- [42] S. Akhavan, J. Abedi-Koupai, S.-F. Mousavi, M. Afyuni, S.-S. Eslamian, and K. C. Abbaspour, "Application of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan–Bahar Watershed, Iran," *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 139, no. 4, pp. 675–688, Dec. 2010.
- [43] Y. Gong, Z. Shen, Q. Hong, R. Liu, and Q. Liao, "Parameter uncertainty analysis in watershed total phosphorus modeling using the GLUE methodology," *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 142, no. 3–4, pp. 246–255, Aug. 2011.
- [44] Z. Li, Q. Shao, Z. Xu, and X. Cai, "Analysis of parameter uncertainty in semi-distributed hydrological models using bootstrap method: A case study of SWAT model applied to Yingluoxia watershed in northwest China," *J. Hydrol.*, vol. 385, no. 1–4, pp. 76–83, May 2010.
- [45] B. Vilaysane, K. Takara, P. Luo, I. Akkharath, and W. Duan, "Hydrological Stream Flow Modelling for Calibration and Uncertainty Analysis Using SWAT Model in the Xedone River Basin, Lao PDR," *Procedia Environ. Sci.*, vol. 28, pp. 380–390, 2015.
- [46] Z. Y. Shen, L. Chen, and T. Chen, "Analysis of parameter uncertainty in hydrological and sediment modeling using GLUE method: a case study of SWAT model applied to Three Gorges Reservoir Region, China," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 16, no. 1, pp. 121–132, Jan. 2012.
- [47] J. Schuol, K. C. Abbaspour, R. Srinivasan, and H. Yang, "Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model," *J. Hydrol.*, vol. 352, no. 1–2, pp. 30–49, Apr. 2008.

- [48] A. Singh, M. Imtiyaz, R. K. Isaac, and D. M. Denis, "Comparison of soil and water assessment tool (SWAT) and multilayer perceptron (MLP) artificial neural network for predicting sediment yield in the Nagwa agricultural watershed in Jharkhand, India," *Agric. Water Manag.*, vol. 104, pp. 113–120, Feb. 2012.
- [49] X. Zhang, Y.-P. Xu, and G. Fu, "Uncertainties in SWAT extreme flow simulation under climate change," *J. Hydrol.*, vol. 515, pp. 205–222, Jul. 2014.
- [50] F. F. Tang, H. S. Xu, and Z. X. Xu, "Model calibration and uncertainty analysis for runoff in the Chao River Basin using sequential uncertainty fitting," *Procedia Environ. Sci.*, vol. 13, pp. 1760–1770, 2012.
- [51] H. M. Yesuf, M. Assen, T. Alamirew, and A. M. Melesse, "Modeling of sediment yield in Maybar gauged watershed using SWAT, northeast Ethiopia," *Catena*, vol. 127, pp. 191–205, Apr. 2015.

BIBLIOGRAFÍA

- B. Lin, X. Chen, H. Yao, Y. Chen, M. Liu, L. Gao, and A. James, "Analyses of landuse change impacts on catchment runoff using different time indicators based on SWAT model," *Ecol. Indic.*, vol. 58, pp. 55–63, Nov. 2015.
- B. Vilaysane, K. Takara, P. Luo, I. Akkharath, and W. Duan, "Hydrological Stream Flow Modelling for Calibration and Uncertainty Analysis Using SWAT Model in the Xedone River Basin, Lao PDR," *Procedia Environ. Sci.*, vol. 28, pp. 380–390, 2015.
- Cdmb, "Plan De Ordenamiento Y Manejo Ambiental Subcuenca Rio Surata," p. 43, 2006.
- F. Tang, H. S. Xu, and Z. X. Xu, "Model calibration and uncertainty analysis for runoff in the Chao River Basin using sequential uncertainty fitting," *Procedia Environ. Sci.*, vol. 13, pp. 1760–1770, 2012.
- G. Kuczera and E. Parent, "Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm," *J. Hydrol.*, vol. 211, no. 1–4, pp. 69–85, Nov. 1998.
- G. Pangare, "The Source of the Problem," *Nature*, vol. 441, p. 28, 2006.
- Griensven, A. Francos, and W. Bauwens, "Sensitivity analysis and autocalibration of an integral dynamic model for a river water quality," *water Sci. Technol.*, pp. 321 – 328, 2002.
- H. M. Yesuf, M. Assen, T. Alamirew, and A. M. Melesse, "Modeling of sediment yield in Maybar gauged watershed using SWAT, northeast Ethiopia," *CATENA*, vol. 127, pp. 191–205, Apr. 2015.

H. M. Yesuf, M. Assen, T. Alamirew, and A. M. Melesse, "Modeling of sediment yield in Maybar gauged watershed using SWAT, northeast Ethiopia," *Catena*, vol. 127, pp. 191–205, Apr. 2015.

H. Wu and B. Chen, "Evaluating uncertainty estimates in distributed hydrological modeling for the Wenjing River watershed in China by GLUE, SUFI-2, and ParaSol methods," *Ecol. Eng.*, vol. 76, pp. 110–121, Mar. 2015.

J. Aouissi, S. Benabdallah, Z. Lili Chabaâne, and C. Cudennec, "Evaluation of potential evapotranspiration assessment methods for hydrological modelling with SWAT—Application in data-scarce rural Tunisia," *Agric. Water Manag.*, Mar. 2016.

J. E. Holguin-Gonzalez, P. Boets, A. Alvarado, F. Cisneros, M. C. Carrasco, G. Wyseure, I. Nopens, and P. L. M. Goethals, "Integrating hydraulic, physicochemical and ecological models to assess the effectiveness of water quality management strategies for the River Cuenca in Ecuador," *Ecol. Modell.*, vol. 254, pp. 1–14, Apr. 2013.

J. E. Nash and J. V. Sutcliffe, "River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles," *Hydrology*, vol. 10, pp. 282–290, 1970.

J. G. Arnold, J. R. Kiniry, R. Srinivasan, J. R. Williams, E. B. Haney, and S. L. Neitsch, "CHAPTER 4 SWAT Input Data: .bsn," *SWAT Input/Output File Doc. Version 2012*, 2012.

J. G. Arnold, J. R. Kiniry, R. Srinivasan, J. R. Williams, E. B. Haney, and S. L. Neitsch, "CHAPTER 5 SWAT Input Data: .sub," *SWAT Input/Output File Doc. Version 2012*, 2012.

J. G. Arnold, J. R. Kiniry, R. Srinivasan, J. R. Williams, E. B. Haney, and S. L. Neitsch, "CHAPTER 14 SWAT Input Data: crop.dat," *SWAT Input/Output File Doc. Version 2012*, pp. 187–212, 2012.

J. G. Arnold, J. R. Kiniry, R. Srinivasan, J. R. Williams, E. B. Haney, and S. L. Neitsch, "Chapter 19 Swat INput DAta : .hru," SWAT Input/Output File Doc. Version 2012, pp. 231–242, 2012.

J. G. Arnold, J. R. Kiniry, R. Srinivasan, J. R. Williams, E. B. Haney, and S. L. Neitsch, "Chapter 22 SWAT Input Data: .Sol," SWAT Input/Output File Doc. Version 2012.

J. G. Arnold, J. R. Kiniry, R. Srinivasan, J. R. Williams, E. B. Haney, and S. L. Neitsch, "CH26 Swat Input Data: .Wwq," SWAT Input/Output File Doc. Version 2012, pp. 345–352, 2012.

J. G. Arnold, J. R. Kiniry, R. Srinivasan, J. R. Williams, E. B. Haney, and S. L. Neitsch, "CH27 Swat Input Data: .Swq," SWAT Input/Output File Doc. Version 2012, pp. 353–366, 2012.

J. G. Arnold, J. R. Kiniry, R. Srinivasan, J. R. Williams, E. B. Haney, and S. L. Neitsch, "CHAPTER 32 SWAT OUTPUT DATA : PRIMARY OUTPUT FILES," SWAT Input/Output File Doc. Version 2012, no. Chapter 3, 2012.

J. Ordóñez, "¿ Qué Es Cuenca Hidrológica ?," Soc. Geológica Lima, vol. 1, pp. 1 – 44, 2011.

J. Schuol, K. C. Abbaspour, R. Srinivasan, and H. Yang, "Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model," J. Hydrol., vol. 352, no. 1–2, pp. 30–49, Apr. 2008.

J. Yang, P. Reichert, K. C. Abbaspour, and H. Yang, "Hydrological modelling of the Chaohe Basin in China: Statistical model formulation and Bayesian inference," J. Hydrol., vol. 340, no. 3–4, pp. 167–182, Jul. 2007.

J. Yang, P. Reichert, K. C. Abbaspour, J. Xia, and H. Yang, "Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China," *J. Hydrol.*, vol. 358, no. 1–2, pp. 1–23, 2008.

K. C. Abbaspour, "SWAT - CUP SWAT Calibration and Uncertainty Programs," 2011.

K. C. Abbaspour, E. Rouholahnejad, S. Vaghefi, R. Srinivasan, H. Yang, and B. Kløve, "A Continental-Scale Hydrology and Water Quality Model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model," *J. Hydrol.*, vol. 524, pp. 733–752, Mar. 2015.

K. C. Abbaspour, J. Yang, I. Maximov, R. Siber, K. Bogner, J. Mieleitner, J. Zobrist, and R. Srinivasan, "Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT," *J. Hydrol.*, vol. 333, no. 2–4, pp. 413–430, 2007.

M. B. Ercan, J. L. Goodall, A. M. Castronova, M. Humphrey, and N. Beekwilder, "Calibration of SWAT models using the cloud," *Environ. Model. Softw.*, vol. 62, pp. 188–196, Dec. 2014.

M. D. McKay, R. J. Beckman, and W. J. Conover, "Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code," *Technometrics*, vol. 21, no. 2, pp. 239–245, May 1979.

M. Gallagher and J. Doherty, "Parameter estimation and uncertainty analysis for a watershed model," *Environ. Model. Softw.*, pp. 1000 – 1020, 2007.

N. Funke, S. H. H. Oelofse, J. Hattingh, P. J. Ashton, and A. R. Turton, "IWRM in developing countries: Lessons from the Mhlathuze Catchment in South Africa," *Phys. Chem. Earth*, vol. 32, no. 15–18, pp. 1237–1245, 2007.

P. Krause and D. P. Boyle, "Advances in Geosciences Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment," *Adv. Geosci.*, vol. 5, no. 89, pp. 89–97, 2005.

P. Reichert, "Sensitivity, Identifiability, and Uncertainty Analysis," 2005.

P. W. Gassman, M. R. Reyes, C. H. Green, and J. G. Arnold, "The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions," *Trans. Asabe*, vol. 50, no. 4, pp. 1211–1250, 2007.

R. Legates and G. J. McCabe, "Evaluating the use of 'goodness-of-fit' Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation," *Water Resour. Res.*, vol. 35, no. 1, pp. 233–241, Jan. 1999.

R. S. Blasone, J. A. Vrugt, H. Madsen, D. Rosbjerg, B. A. Robinson, and G. A. Zyvoloski, "Generalized likelihood uncertainty estimation (GLUE) using adaptive Markov Chain Monte Carlo sampling," *Adv. Water Resour.*, vol. 31, no. 4, pp. 630–648, 2008.

S. Akhavan, J. Abedi-Koupai, S.-F. Mousavi, M. Afyuni, S.-S. Eslamian, and K. C. Abbaspour, "Application of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan–Bahar Watershed, Iran," *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 139, no. 4, pp. 675–688, Dec. 2010.

S. B. Dessu and A. M. Melesse, "Modelling the rainfall-runoff process of the Mara River basin using the Soil and Water Assessment Tool," *Hydrol. Process.*, vol. 26, no. 26, pp. 4038–4049, Dec. 2012.

S. Bastola, C. Murphy, and J. Sweeney, "The role of hydrological modelling uncertainties in climate change impact assessments of Irish river catchments," *Adv. Water Resour.*, vol. 34, no. 5, pp. 562–576, May 2011.

S. G. Setegn, R. Srinivasan, B. Dargahi, and A. M. Melesse, "Spatial delineation of soil erosion vulnerability in the Lake Tana Basin, Ethiopia," *Hydrol. Process.*, vol. 23, no. 26, p. n/a–n/a, 2009.

Singh, M. Imtiyaz, R. K. Isaac, and D. M. Denis, "Comparison of soil and water assessment tool (SWAT) and multilayer perceptron (MLP) artificial neural network for predicting sediment yield in the Nagwa agricultural watershed in Jharkhand, India," *Agric. Water Manag.*, vol. 104, pp. 113–120, Feb. 2012.

W. Jiao, W. Ouyang, F. Hao, H. Huang, Y. Shan, and X. Geng, "Combine the soil water assessment tool (SWAT) with sediment geochemistry to evaluate diffuse heavy metal loadings at watershed scale.," *J. Hazard. Mater.*, vol. 280, pp. 252–9, Sep. 2014.

W. KL and C. I, "Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable SWAT model," *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.*, pp. 1077–1089, 2005.

X. Wang, S. Shang, W. Yang, and A. M. Melesse, "Simulation of an agricultural watershed using an improved curve number method in swat," *Trans. ASABE*, vol. 51, no. 4, pp. 1323–1339, 2008.

X. Zhang, Y.-P. Xu, and G. Fu, "Uncertainties in SWAT extreme flow simulation under climate change," *J. Hydrol.*, vol. 515, pp. 205–222, Jul. 2014.

Xue, B. Chen, and H. Wu, "Parameter Uncertainty Analysis of Surface Flow and Sediment Yield in the Huolin Basin, China," *J. Hy[1]* C. Xue, B. Chen, H. Wu, "param. Uncertain. Anal. Surf. Flow Sediment Yield Huolin Basin, China," *J. Hydrol. Eng.*, vol. 18, no. 7, pp. 746–759, 2013. *drologic Eng.*, vol. 18, no. 7, pp. 746–759, 2013.

Y. Gong, Z. Shen, Q. Hong, R. Liu, and Q. Liao, "Parameter uncertainty analysis in watershed total phosphorus modeling using the GLUE methodology," *Agric. Ecosyst. Environ.*, vol. 142, no. 3–4, pp. 246–255, Aug. 2011.

Z. Li, Q. Shao, Z. Xu, and X. Cai, "Analysis of parameter uncertainty in semi-distributed hydrological models using bootstrap method: A case study of SWAT model applied to Yingluoxia watershed in northwest China," *J. Hydrol.*, vol. 385, no. 1–4, pp. 76–83, May 2010.

Z. Y. Shen, L. Chen, and T. Chen, "Analysis of parameter uncertainty in hydrological and sediment modeling using GLUE method: a case study of SWAT model applied to Three Gorges Reservoir Region, China," *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, vol. 16, no. 1, pp. 121–132, Jan. 2012.

Zhang, X. Chen, and H. Yao, "SWAT-CS(enm): Enhancing SWAT nitrate module for a Canadian Shield catchment.," *Sci. Total Environ.*, vol. 550, pp. 598–610, Apr. 2016.

ANEXOS

ANEXO A: CONFIGURACIÓN DE LOS PARAMETROS POR TIPOS

La configuración es tomada de los capítulos 4[31], 5[32], 14[33], 19[34], 22[35], 26[36] y 27[37] del SWAT Input Data Versión 2012

El Soil and Water Assessment Tool SWAT tiene la siguiente configuración para que los usuarios puedan acceder al software sin sentirse abrumados con toda la información que maneja este software.

- Dimensiones de la Cuenca
- Clima (Balance y producción de Agua)
- Sedimento
- Nutrientes
- Pesticidas
- Bacterias
- Calidad del Agua
- Plantas
- Gestión
- Procesos del Canal (Red Hidrográfica)
- Procesos (Embalses)

Para el proceso de calibración se analizan solo estos componentes: Clima, Sedimento Nutrientes, Procesos del Canal y Calidad del Agua.

CLIMA

Procesos de Nieve

SFTMP: Temperatura de Nevadas (° C). La temperatura de las nevadas debe estar en un rango entre -5° C y 5 ° C. Se recomienda que SFTMP sea igual a 1.

SMTMP: Temperatura base de fusión de la Nieve (°C). La base de derretimiento de la nieve la temperatura debe estar entre -5 °C y 5 °C. Un defecto recomendado para esta variable es SMTMP = 0,50.

SMFMX: Factor de derretimiento de la nieve (21 de junio). Si la cuenca se encuentra en el hemisferio sur el SMFMX será el factor mínimo de fusión.

SMFMN: Factor de derretimiento de la nieve (21 de diciembre). Si la cuenca se encuentra en el hemisferio sur el SMFMN será el factor máximo de fusión

TIMP: Factor de retraso de la Temperatura: Éste valor puede variar entre 0.01 y 1.0 pero tiende al valor de 0.

Temperatura

TMPSIM: Código de entrada de la Temperatura. Esta variable identifica el método del modelo que se utilizara para procesar los datos de temperatura. Hay dos opciones: 1) Fecha de lectura medida para cada subcuenca y 2) Temperatura máxima sobre la temperatura mínima generada para cada subcuenca.

TMPMX: Temperatura máxima media diaria o mensual del aire. Este valor se calcula sumando las temperaturas máximas de cada día del mes para todos los años que se registren y este valor se divide por el número de días sumados.

TMPMN: Temperatura mínima media diaria o mensual del aire. Este valor se calcula sumando las temperaturas mínimas de cada día del mes para

todos los años que se registren y este valor se divide por el número de días sumados.

Ciclo Hidrológico

ESCO: Factor de Compensación de la evaporación del suelo. Este coeficiente se ha incorporado para permitir al usuario modificar la distribución de profundidad, se utiliza para cumplir con la demanda evaporativa teniendo en cuenta el efecto de la capilaridad, formación de costras y grietas. Éste factor se encuentra en el siguiente rango de valores entre 0.01 y 1.0.

CANMX: Almacenamiento máximo del dosel arbóreo (hábitat que comprende la región de las copas y regiones superiores de los árboles de un bosque). La copa de la planta puede afectar significativamente la infiltración, escorrentía superficial y la evapotranspiración. La lluvia cae, dosel interceptación angiogramas la energía erosiva de las gotitas y atrapa una porción de la precipitación dentro de la copa. La influencia el dosel ejerce sobre estos procesos es una función de la densidad de la cubierta vegetal y la morfología de las especies de plantas

EPCO: Factor de compensación de consumo de la planta. La cantidad de consumo del agua que se produce en un día determinado es una función de la cantidad de agua requerida por la planta para la transpiración. Si en las capas superiores no hay la cantidad de agua para satisfacer el consumo de la planta los usuarios pueden permitir que las capas inferiores intervengan para compensar esta cantidad de agua faltante.

SOL ALB: Albedo de la tierra húmeda. Es la relación de la cantidad de radiación solar reflejada por un cuerpo a la cantidad incidente sobre ella, expresada como fracción

GW REVAP: Coeficiente de las Aguas Subterráneas. El agua puede pasar del acuífero superficial en la zona no saturada. El agua también se puede retirar del acuífero por las plantas de raíces profundas que son capaces de

la absorción de agua directamente del acuífero. Este proceso es muy importante en las cuencas donde la zona saturada no está muy lejos de la superficie o cuando las raíces profundas están creciendo.

REVAPMN: Umbral profundidad del agua del acuífero de poca profundidad para “REPAV” o percolación para el acuífero profundo que se produzca. El movimiento del agua del acuífero superficial a la zona no saturada

Escorrentía Superficial

ICN: Método diario del número de la curva, se calcula de la siguiente manera: 0 si CN se toma como una función de la humedad del suelo; 1 si CN se toma como una función de la evapotranspiración de la planta.

CNCOEF: Coeficiente de la planta ET para el numero de la curva. Este coeficiente de ponderación ET es utilizado para la retención de agua.

SURLAG: Coeficiente de escurrimiento superficial de retraso. En las grandes subcuencas con un tiempo de concentración mayor que un día, solo una parte de la escorrentía llega a la red principal. SURLAG controla la fracción total del agua disponible que permitirá entrar en el alcance en un sólo día. Si no se tiene conocimiento de este valor el modelo introduce el valor de 4.0.

ICRK: Grieta del flujo. Se tienen dos opciones:

Asignar el valor de 0 si no quiere modelar la grieta en el suelo. O Asignar el valor de 1 si quiere modelar la grieta en el suelo.

Esta característica es nueva en SWAT y se ha probado de forma limitada en algunas zonas de Texas.

Por defecto se asigna el valor de 0.

CN2: Numero de la curva inicial SCS para la condición de la humedad II. El número de la curva SCS es una función de la permeabilidad de la tierra, el uso de la tierra y las condiciones del suelo agua,

Tiempo de Concentración

CH L: Longitud del canal en la subcuenca (km). La longitud del canal es la distancia desde la salida subcuenca hasta el punto más distante en la subcuenca.

CH K: Conductividad hidráulica efectiva en el canal afluente aluviones (mm/h).

CH N: Valor de Manning para los canales tributarios

SLSUBBSN: Longitud de inclinación. Esta es la distancia que el flujo laminar es la superficie dominante del proceso de escorrentía. Este valor se puede determinar a través de los mapas topográficos.

OV N: Valor de Manning “n” para el flujo superficial.

Agua del Suelo

SOL Z (# Capas): Profundidad de la superficie del suelo a la parte inferior de la capa mm

SOL BD (# Capas): Densidad aparente del suelo.

SOL AWC (# Capas): Es el Agua aprovechable o disponible de la capa del suelo (mm H₂O / mm suelo).

SOL K (# Capas): Conductividad Hidráulica. Es el gradiente hidráulico.

Aguas Subterráneas

GW DELAY: Tiempo de retardo de las aguas subterráneas (días). El agua que se mueve más allá de la profundidad más baja del perfil del suelo mediante la filtración entra y fluye a través de la zona no saturada antes de convertirse en acuífero superficial.

ALPHA BF: Factor de caudal base alfa (1/ día). Es un índice directo de respuesta de flujo de aguas subterráneas a los cambios en la recarga.

GWQMN: Profundidad del Umbral del agua en el acuífero superficial requerido para el flujo de retorno.

RCHRG DP: Fracción de acuíferos por percolación profunda. La fracción de percolación desde la zona de la raíz que recarga el acuífero profundo.

WUSHAL (Meses): Es el promedio de la salida del agua del acuífero superficial

WUDEEPL (Meses): Es el promedio de la salida del agua del acuífero profundo.

SEDIMENTO

Erosión de los Sedimentos

ADJ PKR: Factor de ajuste de la tasa piso para el enrutamiento de los sedimentos en la subcuencas. El enrutamiento de los sedimentos es una función de la tasa de flujo máximo y la media del flujo diario. Este factor se utiliza en la ecuación MUSLE e impacta en la cantidad de erosión generada en las HRUs.

HRU SLP: Calidad de la pendiente media (m/m).

Las interfaces de SIG pueden asignar este valor a todas las HRUs dentro de una subcuenca. Este valor puede variar por el tipo del suelo y la cobertura vegetal.

LAT SED: Es la concentración de sedimentos en el flujo de agua subterránea (mg/L).

FILTERW: Cobertura del canal. Es el ancho de banda que se define en una HRU.

SOL CLAY (# Capas): El contenido de arcilla (% del peso del suelo). El porcentaje de las partículas del suelo que son < 0.002 mm de diámetro equivalente.

SOL SILT (# Capas): El contenido de limo (% del peso del suelo). El porcentaje de las partículas del suelo que tiene un diámetro equivalente entre 0.05 0.002 mm.

SOL SAND (# Capas): El contenido de arena (% del peso del suelo). El porcentaje de las partículas del suelo que tiene un diámetro equivalente entre 2.0 y 0.05 mm.

SOL ROCK (# Capas): El contenido de fragmentos de roca (% del peso total). El porcentaje de las partículas del suelo que tiene un diámetro > 2.0 mm.

USLE K (Capa Superior): Ecuación de erosionabilidad del suelo factor K. Algunos suelos se erosionan más fácilmente que otros causados por las mismas propiedades del suelo.

USLE P: Ecuación del factor de la práctica de apoyo. Es la relación de la pérdida del suelo con una práctica específica de apoyo como la siembra y la labranza.

USLE C: Valor mínimo del factor de USLE C por la erosión del agua aplicable a la cobertura del suelo.

ERORGN: Relación de enriquecimiento del N Orgánico para cargar con sedimento. Como escorrentía superficial fluye sobre la superficie del suelo, parte de la energía del agua se utiliza para recoger y transportar los suelos partículas. Las partículas más pequeñas pesan menos y son más fácil de transportar que las partículas más gruesas. Cuando la partícula la distribución del tamaño de los sedimentos transportados se compara con la de la capa de superficie del suelo, la carga de sedimentos a la principal canal tiene una mayor proporción de partículas de tamaño de arcilla. En Es decir, la carga de sedimentos se enriquece en partículas de arcilla. El nitrógeno orgánico en el suelo se une principalmente a los coloidales (partículas de arcilla), por lo que la carga de sedimentos también contener una mayor proporción o concentración de N orgánico que la encontrada en la capa superficial del suelo. La relación de enriquecimiento se define como la relación de la concentración de nitrógeno orgánico transportado con los sedimentos a la concentración en la capa superficial del suelo. Para calcular la relación de enriquecimiento, el valor para ERORGN se pone a cero.

NUTRIENTES

Ciclo de Nitrógeno

RCN: La concentración de nitrógeno en las precipitaciones (mg N / L). Si no se introduce ningún valor para RCN, el modelo establecido $RCN = 1,0$.

CMN: Factor de tasa de mineralización del humus del activo orgánica nutrientes (N y P). Si no se especifica ningún valor para el CMN, el modelo establecido $CMN = 0,0003$.

CDN: Desnitrificación coeficiente de ritmo exponencial. Este coeficiente permite al usuario controlar la velocidad de desnitrificación. Los valores aceptables para CDN rango de 0,0 a 3,0. Si ningún valor para el CDN se especifica, el modelo establece $CDN = 1,4$.

SDNCO: Contenido de agua umbral de desnitrificación. Fracción del contenido de agua por encima del cual la capacidad de campo desnitrificación se lleva a cabo. La desnitrificación es la reducción bacteriana de nitrato, NO_3^- , a N_2 o N_2O los gases bajo condiciones anaeróbicas (reducido) condiciones. Porque SWAT no hace un seguimiento del estado redox de las capas del suelo, la presencia de condiciones anaeróbicas en una capa de suelo se define por esta variable. Si el contenido de agua del suelo calcula como fracción de capacidad de campo es $\geq SDNCO$, a continuación, son condiciones anaeróbicas asume que es presente y desnitrificación se modela. Si el contenido de agua del suelo calcula como una fracción de la capacidad de campo es $< SDNCO$, a continuación, se asumen condiciones aeróbicas a estar presentes y desnitrificación no se modela. Si no se especifica ningún valor para SDNCO, el modelo establecido $SDNCO = 1.10$.

N UPDIS: Parámetro de distribución de absorción del nitrógeno. La Densidad de la raíz es mayor cerca de la superficie, y el nitrógeno de la planta es captado en la parte superior del suelo. La importancia del

parámetro de distribución de absorción de nitrógeno radica en su control sobre la cantidad máxima de nitrato retirado de las capas superiores. Debido a que los 10 mm superiores del perfil del suelo interactúan con la escorrentía superficial, la absorción de nitrógeno influirá en la cantidad de nitrato disponible para el transporte de la escorrentía superficial. Si no se introduce ningún valor para N_UPDIS, el modelo establece N_UPDIS = 20.0.

NPERCO: Coeficiente de percolación de nitratos. NPERCO controla la cantidad de nitrato retirados de la capa superficial de la escorrentía con respecto a la cantidad extraída a través filtración. El valor de NPERCO puede variar de 0.01 a 1.0. Si no se introduce ningún valor para NPERCO, el modelo establece NPERCO = 0,20

SOL NO3: Es Concentración de nitratos en la capa de suelo (mg N / kg de suelo o ppm).

SOL ORGN: Es la Concentración inicial de N orgánico en la capa de suelo (mg N / kg suelo o ppm).

SHALLST N: Concentración inicial de nitrato en el acuífero superficial. (mg N / L o ppm).

Ciclo de Fósforo

P UPDIS: Parámetro de distribución de consumo del fósforo. La importancia del parámetro de distribución de consumo del fósforo reside en su control sobre el importe máximo de la solución P retirado de la parte superior capas. Debido a que los 10 mm superiores del interactúa el perfil del suelo con la escorrentía superficial, éste parámetro influirá en la cantidad de fósforo disponible en el transporte de la escorrentía superficial.

PPERCO: Coeficiente de percolación del fósforo (10 m³ / Mg). El valor de PPERCO puede variar desde 10.0 hasta 17.5 Si no se introduce el valor de PPERCO, el modelo será establecido PPERCO = 10.0.

PSP: Índice de disponibilidad de fósforo.

SOL SOLP: Es la Concentración inicial de fósforo en la capa del suelo (mg P / kg de suelo o ppm).

ERORGP: Factor de enriquecimiento de fósforo en los sedimentos. El factor de enriquecimiento se define como la relación entre la concentración de fósforo transportado con el sedimento y la concentración de fósforo en la capa superficial del suelo.

PROCESOS DEL CANAL (“Trayectoria del flujo que se va a modelar”)

Enrutamiento del Agua del Canal

MSK CO1: Coeficiente de calibración utilizado para controlar el impacto del almacenamiento constante de tiempo (K metro) Para el flujo normal (donde el flujo normal es cuando el río está en 100% de profundidad del caudal total).

MSK CO2: Coeficiente de calibración utilizado para controlar el impacto del almacenamiento constante de tiempo (K metro) Para un flujo bajo (donde el flujo bajo es cuando río está en 10% de profundidad del caudal total).

CH W: Anchura media de canal principal en la parte superior del banco (m).

CH D: La profundidad del canal principal de la parte superior del banco de fondo (m).

CH S: Inclinación de canal principal a lo largo de la longitud del canal (m / m).

CH L: Longitud del canal principal (km).

CH N: Valor de Manning "n" para el canal principal.

CH K: Conductividad hidráulica efectiva en el aluvión del canal principal (mm / h).

CH EQN Métodos de enrutamiento de sedimentos: Modelo utilizado para la erosión del caudal. Sí CH_EQ=0 Es la ecuación simplificada de Bagnold

CH COV: El factor de canal de erosionabilidad es conceptualmente similar al factor de erosionabilidad del suelo utilizado en la ecuación USLE.

Enrutamiento de los Sedimentos del Canal

SPCON: Parámetro lineal para el cálculo de la cantidad máxima de sedimentos que pueden ser reencauzados durante el enrutamiento del canal de sedimentos.

SPEXP: Parámetro Exponencial para el cálculo de los sedimentos en reencauzadas en el enrutamiento del canal de sedimentos.

CH EROD: Se establece en un valor entre 0,0 y 1,0. El valor 0,0 indica que en el canal presenta resistencia a la erosión mientras que un valor de 1,0 indica que no hay resistencia a la erosión

CALIDAD DEL AGUA

Calidad del Agua en General

K P: Constante media de saturación para el fósforo (mg P / L). Esta constante define la concentración de N o P en la que el crecimiento de algas se limita a 50% de la tasa de crecimiento máximo. Los valores típicos de K PAG oscilará 0,001 a 0,05 mg P / L. Si no se introduce ningún valor para K_P, el modelo establecido $K_P = 0.025$.

AI2: Fracción de biomasa de algas con el porcentaje de fósforo (P mg / mg alg). Los valores para AI2 deben caer en el rango de 0,01-0,02. Si ningún valor se introduce por AI2, el modelo establecido $AI2 = 0,015$.

Calidad de la Corriente de Agua

RS2: Bentónica (sedimento). Tasa de fósforo disuelto a 20 ° C (mg P disuelto / (m² · día)). Si ningún valor para RS2 se ingresa, el modelo establece $RS2 = 0,05$ mg disueltos Pm² · día)

RS5: Fósforo orgánico tasa de sedimentación en el alcance a 20° C (día⁻¹). Los valores para RS5 deben estar en el rango 0,001 a 0,1 días⁻¹. Si no

se introduce ningún valor para el RS5, la modelo establece $RS5 = 0,05$ días⁻¹.

BC4: Constante para la mineralización del P orgánico disuelto tasa de P en el alcance a 20 ° C (día⁻¹). Los valores para BC4 deben estar en el rango 0,01-0,70 días⁻¹. Si no se introduce ningún valor para BC4, la modelo establece $BC4 = 0,35$ día.

Oxígeno Disuelto

ISUBWQ: Los algoritmos utilizados para calcular las cargas de algas, demanda orgánica biológica de oxígeno disuelto y carbonoso oxígeno a la corriente de la red se obtuvieron a partir de los resultados de estudios limitados y todavía están en fase de pruebas. ISUBWQ permite al usuario optar por aplicar o no aplicar los algoritmos. 0 no calcular las cargas de algas / o ajuste el CBOD disuelto oxígeno a concentración saturada de oxígeno 1 / calcular CBOD / cargas de oxígeno disuelto utilizando algas algoritmos documentados en la documentación teórica La opción por defecto es $ISUBWQ = 0$

PLANTAS

Residuos

RSDIN: Cobertura de residuos inicial (kg / ha).

RSDCO: Coeficiente de descomposición de los residuos. La fracción de residuo que se descompone en un día suponiendo la humedad, la temperatura. Si no se introduce ningún valor para RSDCO, el modelo establecido $RSDCO = 0.05$

ANEXO B: ARCHIVOS DE SALIDA DEL SOFTWARE SWAT

RESUMEN DE SALIDA: Este es el primer archivo que el usuario debe examinar para entender los resultados de la cuenca.

UNIT TIME: *Acá encontrará el Paso del tiempo diario, el Paso del Tiempo mensual y el Paso del tiempo anual.*

PREC: Promedio de las precipitaciones en las cuencas hidrográficas para el día, mes o año (mm)

SURQGEN: Contribución de la escorrentía superficial al caudal de HRU durante la simulación. (Cantidad generada antes de la transmisión bache, humedales y estanques - pérdidas mm)

LATQ: Flujo lateral contribución a estos flujos en el decisivo para el día, mes o año (mm)

GWQ: Contribución de las aguas subterráneas a las cuencas hidrográficas en el día, mes o año (mm)

PERCO LATE: Percolación del agua en las cuencas hidrográficas para el día, mes o año (mm)

TILE Q: Contribución del flujo drenaje en las cuencas hidrográficas en el día, mes o año (mm)

SW: La cantidad de agua almacenada en el perfil del suelo para el día, mes o año (mm)

ET: Evapotranspiración real para la día, mes o año (mm).

PET: Evapotranspiración potencial en las cuencas hidrográficas del día, mes o año (mm)

WATER YIELD: La producción de agua al caudal de HRUS en decisivo para el día, mes o año (mm)

SED YIELD: La producción de sedimentos de HRUS en la cuenca del día, mes o año (toneladas métricas / ha)

NO3 SURQ: Cantidad de nitrato transmitido en la escorrentía superficial de las cuencas hidrográficas para el día, mes o año (kg N / ha)

NO3 LATQ: Cantidad de nitrato transmitido en el flujo lateral para El día, mes o año (kg N / ha) **NO3 PERC**: Cantidad de Nitrato de la percolación en las cuencas hidrográficas para el día, mes o año (kg N / ha)

NO3CROP: Absorción de N de la planta en las cuencas hidrográficas para el día, mes o año (kg N / ha).

VALORES PROMEDIOS ANUALES DE LOS PARÁMETROS PARA CADA HRU

HRU: Número de unidad de respuesta hidrológica.

SUB: Subcuenca en la que se encuentra HRU

CPMN: nombre del cultivo

SOIL: Nombre de la serie de suelos

AREA: Son de HRU (km 2)

CN: SCS número de la curva para la humedad la condición II

SWC: Cantidad de agua contenida en el perfil del suelo (mm)

USLE LS: USLE longitud ecuación de la pendiente de los factores (LS)

IRR: Cantidad de agua de riego aplicada al HRU durante la simulación (mm)

AUTON: Promedio Anual de N (orgánico e mineral) de auto-aplicado en HRU (kg N / ha)

AUTOP: Promedio Anual de P (orgánica y mineral) de auto-aplicado en HRU (kg P / ha)

MIXEF: Suma de las eficiencias de mezcla en HRU

PREC: La precipitación en HRU durante la simulación (mm)

SURQ: La escorrentía superficial generada en la cuenca para el día, mes o año (mm)

GWQ: Cantidad de flujo lateral y flujo de las aguas subterráneas contribuyendo al afluente principal de HRU durante la simulación (mm)

ET: Evapotranspiración real en HRU durante simulación (mm)

SED: Rendimiento de sedimentos HRU para la simulación (toneladas métricas / ha)

NO3: El nitrato en la escorrentía superficial y de flujo lateral en HRU durante la simulación (hg / ha de N)

ORGN: Es el N orgánico en la escorrentía superficial en el HRU durante simulación (kg N / ha)

BIOM: El promedio anual de biomasa (peso seco) en el HRU (toneladas métricas / ha)

AVD: Rendimiento anual promedio (peso seco) en el HRU (toneladas métricas / ha)

SURQGEN: Cantidad de escorrentía superficial generada a partir de la HRU antes de encontrar las pérdidas causadas por baches, humedales y estanques (mm-).

ARCHIVOS DE SALIDA DE LOS SEDIMENTOS

RCH: Es el código de caracteres de cuatro letras para el número alcance. Los Número alcance son también los números del hidrograma de la subcuenca como se define en el archivo .fig.

SIG: El código SIG reproducido de archivo de configuración de las cuencas hidrográficas (.higo).

MON: paso de tiempo todos los días paso mensual de tiempo: el mes (1-12)
paso de tiempo anual: año de cuatro dígitos

AREA: área de drenaje del HRU (km 2)

SED IN: Cantidad total de sedimentos transportados en alcance durante el paso de tiempo (Ton)

SED OUT: Cantidad total de sedimentos transportados fuera del alcance durante el intervalo de tiempo (Ton)

SAND IN: Cantidad de Arena transportada al alcance durante el paso de tiempo (Ton)

SAND OUT: Cantidad de Arena transportada fuera del alcance durante el paso de tiempo (Ton)

SILT IN: Cantidad de Limo transportado a su alcance durante el paso de tiempo (Ton)

SILT OUT: Cantidad de limo transportado fuera del alcance durante el paso de tiempo (Ton)

CLAY IN: Cantidad de Arcilla transportada a su alcance durante el paso de tiempo (toneladas)

CLAY OUT: Cantidad de Arcilla transportado fuera del alcance durante el paso de tiempo (toneladas)

SMAG IN: Pequeños agregados transportados en alcance durante el intervalo de tiempo (Ton)

SMAG OUT: Pequeños agregados transportados fuera del alcance durante el intervalo de tiempo (Ton)

LAG IN: Grandes agregados transportados en alcance durante el paso de tiempo (Ton)

LAG OUT: Grandes agregados transportados fuera del alcance durante el intervalo de tiempo (Ton)

GRA IN: agregados de grava transportados a su alcance durante el intervalo de tiempo (Ton)

GRA OUT: agregados de grava transportados fuera del alcance durante el paso del tiempo (Ton) **CH BNK:** Erosión de las orillas (Ton)

CH BED: la degradación del canal (Ton)

CH DEP: deposición canal (toneladas)

FP DEP: deposición llanura de inundación (toneladas)

TSS: Sedimentos Suspendidos Totales (mg / L)

Fuente: Documentación del Soil and Water Assessment Tool (SWAT Output Data Versión 2012
Chapter 32[38])

ANEXO C. GLOSARIO DE LOS PARÁMETROS SENSIBLES A LA CALIBRACIÓN

Número de Curva: Es un método muy utilizado en hidrología para determinar la escorrentía. Los valores se encuentran en el siguiente rango 0 a 100, el valor de 0 corresponde a los suelos altamente permeables (toda el agua de la lluvia se transforma en infiltración) y el valor de 100 corresponde a los suelos impermeables (toda el agua de la lluvia se transforma en escorrentía superficial)

Humedad aprovechable del Suelo: Es el exceso de escorrentía en los suelos poco profundos.

Factor de compensación de la Evaporación del Suelo: Este coeficiente se ha incorporado para permitir al usuario modificar la distribución de profundidad, se utiliza para cumplir con la demanda evaporativa teniendo en cuenta el efecto de la capilaridad, formación de costras y grietas.

Propiedades del Suelo: Existen varios parámetros

- Fracción de Porosidad
- Volumen de Grietas
- Profundidad del Suelo
- Conductividad Hidráulica
- Contenido de Arcilla
- Contenido de Limo
- Contenido de Arena
- Contenido de Grava
- Erosión del Suelo

Parámetros de Agua Subterránea: Existen 8 parámetros del Agua Subterránea

- Profundidad inicial de agua en el acuífero superficial (mm H₂O).
- Profundidad inicial de agua en el acuífero profundo (mm H₂O).
- Tiempo de retardo de las aguas subterráneas (días).
- Factor de caudal base alfa (1/ día).
- Profundidad del Umbral del agua en el acuífero superficial requerido para el flujo de retorno.
- Fracción de acuíferos por percolación profunda
- Promedio de la salida del agua del acuífero superficial
- Promedio de la salida del agua del acuífero profundo

Coeficientes revap: Existen dos coeficientes

- Parámetro del agua que pasa del acuífero superficial en la zona no saturada subyacente.
- Percolación que se produce en el acuífero profundo.

Agua aprovechable: Se estima mediante la determinación de la cantidad de agua liberada entre en la capacidad del campo y el punto de marchitez permanente

Rutina de decrecimiento del cultivo: es la atenuación mínima diaria de residuos.

Densidad aparente del Suelo: Expresa la relación de la masa de las partículas sólidas en el volumen total del suelo.

Factor de compensación del consumo de la planta: Es el consumo que se produce en un día determinado Es una función requerida por la planta para el proceso de transpiración.

Conductividad hidráulica del suelo: (Gradiente hidráulico) es una medida de la facilidad de movimiento del agua a través de un medio poroso (suelo).

Factor de ajuste del caudal Pico: es una función de la tasa del caudal máximo y la tasa del caudal medio diario. Este factor se utiliza en el Ecuación MUSLE e impacta la cantidad de erosión generada en el HRU

Coefficiente de Rugosidad de Manning para el canal principal: este parámetro define la rugosidad de las paredes con el que está construido el canal principal.

Longitud promedio de la pendiente: Es la distancia más corta que existe entre las diferentes pendientes

Erosionabilidad del suelo: Algunos suelos se erosionan más fácilmente que otros causados por las mismas propiedades del suelo.

Cobertura del canal: Es el ancho de banda que se define en una HRU.

Parámetros para el cálculo de las cargas de Sedimentos: son los parámetros: lineal y exponencial

Parámetro lineal para calcular la cantidad máxima de sedimentos que puede ser re-entrada durante el tránsito de sedimentos:

La cantidad máxima de sedimento que puede ser transportado se calcula a partir de un segmento de alcance

$$conc_{sed,ch,mx} = c_{sp} * v_{ch,ph}^{spexp}$$

Donde $conc_{sed,ch,mx}$ es la concentración máxima de sedimento que puede ser transportado por el agua (ton / m³ o kg / L), c_{sp} es un coeficiente definido por el usuario, $v_{ch,ph}$ es la velocidad pico de canal (m / s), y **spexp** es un exponente definido por el usuario. SPCON varía entre 0.0001 y 0.01. Si no se introduce algún valor el modelo toma el valor de 0.0001.

Pendiente de las laderas: Es la inclinación que hay en las paredes del canal

Erosión del canal: es una función de las propiedades de la cama o materiales bancarias

Parámetro exponencial para calcular la cantidad máxima de sedimentos que puede ser re-entrado durante el tránsito de sedimentos: La cantidad máxima de sedimentos que puede ser transportados se calcula a partir de un segmento de alcance:

$$conc_{sed,ch,mx} = c_{sp} * v_{ch,ph}^{spexp}$$

Donde $conc_{sed,ch,mx}$ es la concentración máxima de sedimento que puede ser transportado por el agua (ton / m³ o kg / L), c_{sp} es un coeficiente definido por el usuario, $v_{ch,ph}$ es la velocidad máxima del canal de (m / s), y **spexp** es un exponente definido por el usuario. Este exponente varía entre 1.0 y 2.0.

Si no hay un valor el modelo establece que SPEXP = 1,0.

Coeficiente de rugosidad de Manning para los canales tributarios: este parámetro define la rugosidad de las paredes con el que está construido los canales principales.

Fracción de la porosidad para excluir aniones: La conglomeración de los minerales del suelo cargados negativamente con la red de interacción de los aniones tales como nitrato producen una repulsión de las superficies de las partículas. Esta repulsión se denomina adsorción negativa o la exclusión de aniones. Los aniones se excluyen de la zona inmediatamente adyacente a las superficies de minerales debido a la atracción preferencial de cationes a estos sitios.

Coeficiente de Percolación del fósforo: Es la relación que existe entre la concentración de fósforo solución en la superficie de 10 mm de del suelo y la concentración de fósforo en percolado.

Parámetro de distribución de consumo de fósforo: Este parámetro controla la captación y distribución del fósforo. El suelo se divide en dos grupos: capas superiores que interactúan con la escorrentía superficial y las capas inferiores que interactúan con las raíces de las plantas.

Fracción de enriquecimiento de fósforo en los sedimentos: Es la relación que existe entre la concentración de fosforo transportado en el sedimento y la concentración de fósforo en la capa superficial del suelo.

Índice de disponibilidad de fósforo: El software SWAT asume que existe una relación entre las soluciones de Fósforo y el Agua mineral “activa” y se calcula de la siguiente manera:

$$PSP = \frac{P_{\text{Solución final}} - P_{\text{solución inicial}}}{Fert_{\text{min P}}}$$

Donde **PSP** es el índice de disponibilidad de fósforo, $P_{\text{Solución final}}$ es la cantidad de fósforo en solución después de los procesos de fertilización e incubación, $P_{\text{solución inicial}}$ es la cantidad de fósforo en solución antes del proceso de fertilización, y $Fert_{\text{min P}}$ es la cantidad de fertilizante con Fósforo que se le añaden a la muestra.

Si no se presenta un valor SWAT establece el valor de 0.4

Coeficiente de partición de fósforo en el suelo: es la relación que existe entre la concentración de fósforo soluble en una capa superior del suelo de 10 mm y la concentración de fósforo soluble en la escorrentía superficial. El mecanismo de

movimiento del fósforo en el suelo es la *difusión*. Como se produce baja movilidad en la solución del fósforo la escorrentía superficial sólo interactuará parcialmente con la solución del fósforo almacenada en los 10 mm superiores del suelo. Si no se introduce ningún valor el modelo establece que PHOSKD = 175,0.

Concentración inicial de fósforo en el suelo: Al inicio de la simulación se puede definir esta concentración, si no se especifica SWAT inicia la operación con una concentración de 5 mg de P / kg en todas las capas de suelo.

Factor de mineralización del humus: Este factor aplica para el Nitrógeno y el Fósforo. Cuando no se tiene un valor SWAT establece CMN = 0,0003

Coefficiente de percolación del nitrógeno: controla la cantidad de nitrógeno retirado de la capa superficial de la escorrentía con respecto a la cantidad extraída a través filtración

Concentración inicial del nitrógeno en el suelo: La concentración de nitrógeno contenido en sustancias húmicas para todas las capas de suelo se puede definir antes de iniciar la simulación.

Fuente: Documentación del Soil and Water Assessment Tool (SWAT Input Data Versión 2012 capítulo 4[31], capítulo 5[32], capítulo 14[33], capítulo 19[34], capítulo 22[35], capítulo 26[36] y capítulo 27[37])

ANEXO D: SÍNTESIS DE LOS ARTÍCULOS DE INVESTIGACIÓN ACERCA DE LAS METODOLOGÍAS DE CALIBRACIÓN DEL MODELO SWAT

AUTOR	ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN	METODOLOGIA DE CALIBRACIÓN IMPLEMENTADA	PARÁMETROS O CRITERIOS UTILIZADOS EN LA METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN
[39]	Hydrological modelling of the Chaohe Basin in China: Statistical model formulation and Bayesian inference	BAYESIAN INFERENCE WITH CONT. AUTOREGR. ERROR MODEL MCMC	CN2, ESCO, EPCO, SOL_K, SOL_AWC, ALPHA_BF, SLSUBBSN, CH_K2, OV_N, GW_DELAY
[25]	Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT	SUFI-2	SFTMP, SMFMX, SMTMP, TIMP, ALPHA_BF, GW_DELAY, CN2, CH_K2, SOL_AWC, SOL_K, SOL_BD, CANMX_PAST, PRF, SPEXP, SPCON, CH_EROD, CH_COV, PSP, ERORGP, BC4, RS5, RCN, GWNO3, ERORGN, NPERCO, USLE_P, USLE_C, USLE_K
[40]	SWAT-CS (enm): Enhancing SWAT nitrate module for a Canadian Shield catchment.	GLUE	CANMX, ESCO, ESCO, REVAPMN, ALPHA_BF, SOL_AWC, GWQMN, CN2, GW_REVAP, RSDIN, RSDCO, CMN, CDN, SDNCO, NPERCO, ANION_EXCL, ERORGN, N_UPDIS
[41]	Evaluation of potential evapotranspiration assessment methods for hydrological modelling with SWAT—Application in data-scarce rural Tunisia	ParaSol	Alpha_Bf, Cn2, Ch_K2, Ch_N2, ESCO, Sol_Z, Sol_Awc, Slope, Sol_K, Rchrg_Dp, Surlag, EpcO, Gwqmn, Gw_Delay, Gw_Revap, Revapmn
[42]	Application of SWAT model to investigate nitrate leaching in Hamadan–Bahar Watershed, Iran	SUFI-2	CN2, SFTMP, SMTMP, SLSUBBSN, TIMP, SMFMN, ALPHA_BNK, SOL_K, CH_K2, IRR_PAR, SMFMX, ESCO, REVAPMN, EPCO, OV_N, CH_N2, RCHRG_DP, SOL_BD, SOL_AWC, GW_REVAP, SOL_ALB, GWQMN, ALPHA_BF, GW_DELAY, HI, HEAT_UNITS, CDN, SDNCO, RCN, NPERCO, FRT_SURFACE, SHALLST_N, N_UPDIS, SOL_NO_3, ERORGN, SOL_ORGN
[43]	Parameter uncertainty analysis in watershed total phosphorus modeling	GLUE	SOL_ORGP, SOL_SOLP, ERORGP, RSDCO, PHOSKD, PPERCO, PSP, K_P, AI2, RS2, RS5

AUTOR	ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN	METODOLOGIA DE CALIBRACIÓN IMPLEMENTADA	PARÁMETROS O CRITERIOS UTILIZADOS EN LA METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN
	using the GLUE methodology		
[44]	Analysis of parameter uncertainty in semi-distributed hydrological models using bootstrap method: A case study of SWAT model applied to Yingluoxia watershed in northwest China	BAYESIAN INFERENCE WITH CONT. AUTOREGR. ERROR MODEL MCMC	CN2, SOL_AWC, ESCO, SOL_K, TIMP, SMTMP, ALPHA_BF, SMFMX, SURLAG
[45]	Hydrological stream flow modelling for calibration and uncertainty analysis using SWAT model in the Xedone river basin, Lao PDR	SUFI-2	CN2, ALPHA_BF, GW_DELAY, GWQMN, GW_REVAP, ESCO, CH_N2, CH_K2, ALPHA_BNK., SOL_AWC, SOL_K, SOL_BD
[46]	Analysis of parameter uncertainty in hydrological and sediment modeling using GLUE method: a case study of SWAT model applied to Three Gorges Reservoir Region, China	GLUE	CANMX, ALPHA-BNK, SOL-K
[47]	Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model	SUFI-2	CN2_GRAS, CN2_SAVA, SOL_BD_SCL, SOL_AWC_L, SOL_AWC_SCL, SOL_AWC_SL, ALPHA_BF, ESCO, SURLAG, GWQMN, REVAPMN, GW_REVAP, GW_DELAY, RCHRG_DP, MSK_CO1, MSK_CO2
[48]	Comparison of soil and water assessment tool (SWAT) and multilayer perceptron (MLP) artificial neural network for predicting sediment yield in the Nagwa agricultural watershed in Jharkhand, India	ParaSol	USLE_P, CH_EROD, SPCON, CH_COV, SPEXP, USLE_C
[49]	Uncertainties in SWAT extreme flow simulation under climate change	SUFI-2	CH_K2, CN2, ALPHA_BF, GWQMN, GW_REVAP, ESCO, RCHRG_DP, SOL_AWC, SOL_Z, SURLAG
[50]	Model calibration and uncertainty analysis for runoff in the Chao River Basin using sequential uncertainty fitting	SUFI-2	CN2, ALPHA_BF, ESCO, SOL_AWC, SOL_K, CANMX, EPCO, SOL_Z, CH_K2, CH_N2, GW_DELAY, GW_REVAP
[17]	A Continental-Scale Hydrology and	SUFI-2	GWQMN, GW_REVAP, REVAMPM, CN2,

AUTOR	ARTÍCULO DE INVESTIGACIÓN	METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN IMPLEMENTADA	PARÁMETROS O CRITERIOS UTILIZADOS EN LA METODOLOGÍA DE CALIBRACIÓN
	Water Quality Model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model		SOL_AWC, ESCO, HRU_SLP, OV_N, SLSUBBSN, CN2, SOL_AWC, ESCO, GWQMN, GW_REVAP, REVAMPM, SHALLST_N, RCN, NPERO, CMN, SOL_NO3, FRT_SURFACE
[51]	Modeling of sediment yield in Maybar gauged watershed using SWAT, northeast Ethiopia	SUFI-2	USLE_P, HRU_SLP, USLE_K, USLE_C, LAT_SED, SLSUBBSN, SPCON, SPEXP, CH_COV2, CH_N2, CH_S2, CH_K2, CH_COV1

ANEXO E: COMPARACIÓN DE CRITERIOS DE DOS CASOS DE ESTUDIOS: ESTUDIO 1: CUENCA DEL RÍO CHAOHE. Y ESTUDIO 2: CUENCA DEL RÍO THUR

CATEGORÍA	PARÁMETRO O CRITERIO		METODOLOGÍAS							
			GLUE		ParaSol		SUFI-2		BAYESIAN INTERFERENCE WITH MODEL MCMC	
			Cuenca del Río Chaohe	Cuenca del Río Thur	Cuenca del Río Chaohe	Cuenca del Río Thur	Cuenca del Río Chaohe	Cuenca del Río Thur	Cuenca del Río Chaohe	Cuenca del Río Thur
1	a_CN2.mgt	RANGO	(-29.58, -9.84)	(-29.6,-9.8)	(-21.93,-20.08)	(-21.9,-20.1)	(-30.00,-7.23)	(-30.0, -7.2)	(-14.35, -13.04)	(-16.8,-11.6)
		RESULTADO	-16.78	-16.8	-20.97	-21	-26.9	-26.9	-13.75	-14.2
	v_ESCO.hru	RANGO	(0.02, 0.97)	(0.02,0.97)	(0.65, 0.69)	(0.65, 0.69)	(0.43, 1.00)	(0.43,1.0)	(0.49, 0.61)	(0.63,0.75)
		RESULTADO	0.76	0.76	0.67	0.67	0.82	0.82	0.55	0.74
	v_EPCO.hru	RANGO	(0.04, 0.90)	(0.04,0.90)	(0.13, 0.20)	(0.13, 0.20)	(0.34, 1.00)	(0.34,1.0)	(0.40, 0.98)	(0.39,0.98)
		RESULTADO	0.22	0.22	0.16	0.16	1	1	0.62	0.94
	r_SOL_K.sol	RANGO	(-0.36, 0.78)	(-0.36, 0.78)	(-0.41, -0.34)	(-0.41, -0.34)	(-0.58, 0.34)	(-0.58,0.34)	(-0.26, 0.78)	(-0.31,0.78)
		RESULTADO	-0.16	-0.16	-0.37	-0.37	-0.1	-0.1	0.01	-0.29
	a_SOL_AWC.sol	RANGO	(0.01, 0.15)	(0.01, 0.15)	(0.08, 0.08)	(0.08, 0.08)	(0.05, 0.15)	(0.05,0.15)	(0.09, 0.09)	(0.1, 0.13)
		RESULTADO	0.11	0.11	0.07	0.07	0.07	0.07	0.09	0.12
	v_ALPHA_BF.gw	RANGO	(0.06, 0.97)	(0.06, 0.97)	(0.08, 0.13)	(0.08, 0.13)	(0.23, 0.74)	(0.23, 0.74)	(0.10, 0.11)	(0.11, 0.15)
		RESULTADO	0.12	0.12	0.12	0.12	0.51	0.51	0.1	0.14
	v_GE_DELAY.gw	RANGO	(9.72, 289.29)	(9.7, 289.3)	(91.23, 15.20)	(91.2,115.2)	(100.24, 300.00)	(100.2, 300)	(17.42, 26.11)	(17.8,33.3)
		RESULTADO	159.58	159.58	107.7	107.7	190.07	190.07	24	25.5
	r_SLSUBBSN.hru	RANGO	(-0.56, 0.46)	(-0.56,0.46)	(-0.60, -0.58)	(-0.60,-0.58)	(-0.60, 0.03)	(-0.60,0.03)	(-0.57, 0.04)	(-0.56,0.15)
		RESULTADO	-0.45	-0.45	-0.59	-0.59	-0.52	-0.52	-0.41	-0.55
	a_CH_K2.rte	RANGO	(6.01, 144.82)	(6.0, 144.8)	(27.72, 37.67)	(27.72,37.67)	(69.42, 150.00)	(69.4, 150.0)	(78.87, 93.26)	(68.0, 86.2)
		RESULTADO	78.19	78.19	35.7	35.7	83.95	83.95	90.18	78.3
	a_OV_N.hru	RANGO	(0.00, 0.20)	(0.00, 0.20)	(0.07, 0.10)	(0.07, 0.10)	(0.00, 0.11)	(0.00, 0.11)	(0.01, 0.20)	(0.00, 0.19)
		RESULTADO	0.05	0.05	0.11	0.11	0.06	0.06	0.19	0.12
σ_{dry}	RANGO							(0.26, 0.34)	(0.81,1.10)	
	RESULTADO	-	-	-	-	-	-	0.31	0.93	
σ_{wet}	RANGO							(0.67, 0.90)	(2.4,3.9)	
	RESULTADO	-	-	-	-	-	-	0.73	2.81	

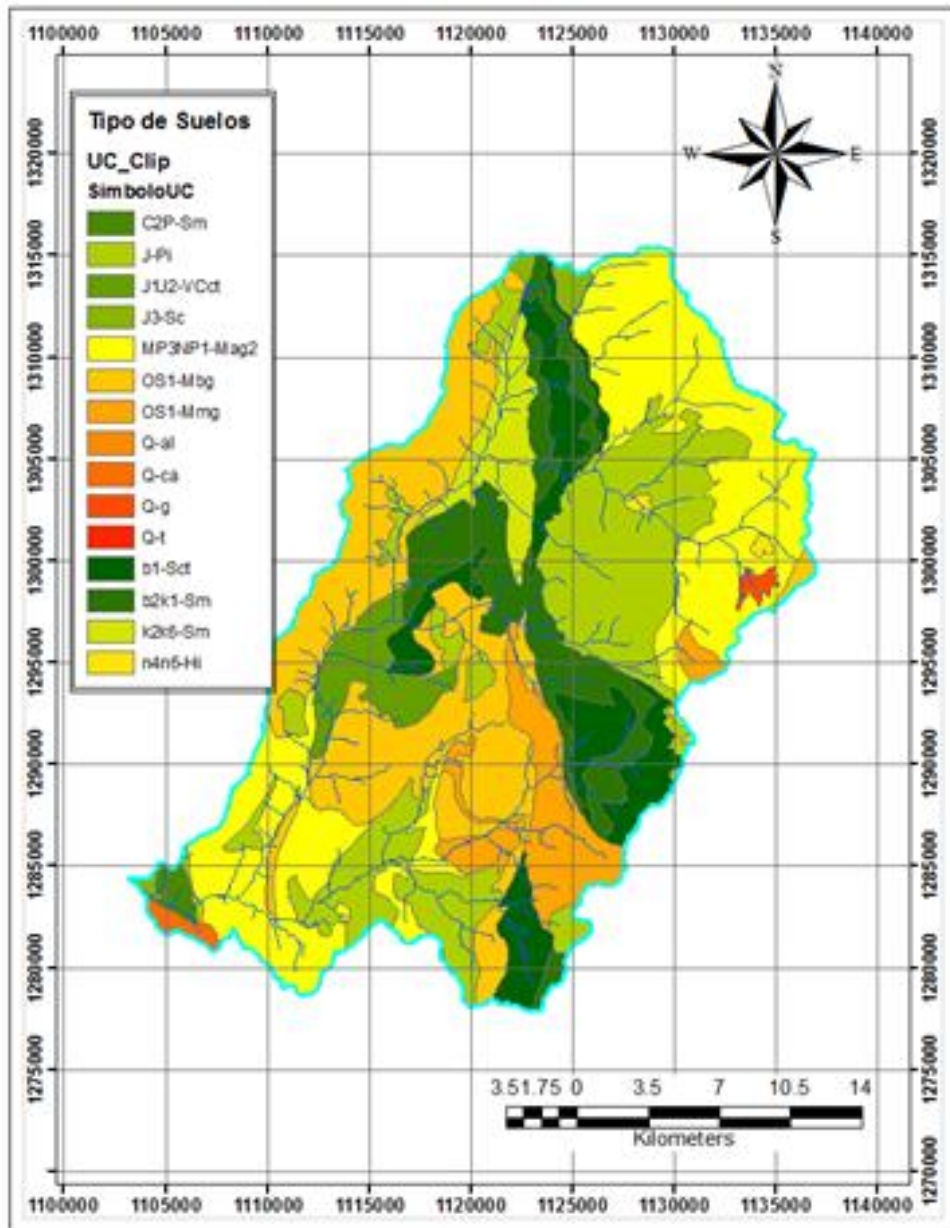
CATEGORÍA	PARÁMETRO O CRITERIO	METODOLOGÍAS								
		GLUE		ParaSol		SUFI-2		BAYESIAN INTERFERENCE WITH MODEL MCMC		
	T_{dry}	RANGO							(1.32, 2.08)	(29.5, 53.8)
		RESULTADO	-		-	-	-	-	1.38	38.13
	T_{wet}	RANGO							(29.63, 51.75)	(2.4, 8.0)
		RESULTADO	-		-	-	-	-	31.12	3.42
	Λ	RANGO							(2.39, 7.48)	-
		RESULTADO	-		-	-	-	-	2.48	-
	Correlaciones de parámetros		Si	-	Si	-	No	-	No	-
2	Coeficiente NSE para calibración		0.8	0.8	0.82	0.82	0.8	0.8	0.77	0.77
	Coeficiente NSE para validación		0.78	0.78	0.81	0.81	0.75	0.75	0.73	0.77
	Coeficiente de determinación R^2 para la calibración		0.8	0.80 (0.84)	0.82	0.82	0.81	0.81	0.78	0.78
	Coeficiente de determinación R^2 para la validación		0.84		0.85	0.85	0.81	0.81	0.81	0.81
	Logaritmo de la función de densidad de probabilidad posterior para la calibración		-2124	-1989	-2293	-2049	-2620	-2426	-1460	-1521
	Logaritmo de la función de densidad de probabilidad posterior para la validación		-994	(-926)	-1237	(-1043)	-1232	(-1095)	-815	-866
3	Factor P para la calibración		79%	79% (69%)	18%	18% (20%)	84%	84% (82%)	85%(10%)	85% (84%)
	Factor P para la validación		69%		20%		82%		85%(7%)	
	Factor R para la calibración		0.65	0.65 (0.51)	0.08	0.08 (0.07)	1.03	1.03 (0.83)	1.48 (0.08)	1.47 (1.19)
	Factor R para la validación		0.51		0.07		0.82		1.16 (0.06)	
	CRPS para la calibración		1.64		0.58		1.62		1.90 (0.54)	

CATEGORÍA	PARÁMETRO O CRITERIO	METODOLOGÍAS								
		GLUE		ParaSol		SUFÍ-2		BAYESIAN INTERFERENCE WITH MODEL MCMC		
	CRPS para la validación		1.87		0.56		2.03		1.95 (0.57)	
4	La incertidumbre esta descrita por los parámetros de la incertidumbre		Todas las fuentes de incertidumbre	Todas las fuentes de incertidumbre	Solo hay incertidumbre en los parámetros	Solo hay incertidumbre en los parámetros	Todas las fuentes de incertidumbre	Todas las fuentes de incertidumbre	Solo hay incertidumbre en los parámetros	Solo hay incertidumbre en los parámetros
	Fuente de incertidumbre de predicción		Incertidumbre en los parámetros		Incertidumbre en los parámetros		Incertidumbre en los parámetros		la incertidumbre de parámetros + todas las otras incertidumbres descritos por el modelo de error autorregresivo.	
	Bases Teóricas		a. La normalización de la medida de la verosimilitud generalizada		a. Los mínimos cuadrados (teoría de probabilidad).		a. función objetivo Generalizado		a. función de verosimilitud (Teoría de la probabilidad)	
			b. estrategia de muestreo aleatorio primitiva		b. SCE-UA estrategia de muestreo basado		b. hipercubo latino de muestreo; restricción de intervalos de muestreo		b. MCMC a partir de conjunto de parámetros óptima basada en SCE-UA	
	La capacidad de Prueba de Stat. assum.		No		Sí		No		Sí	
Resultado de la Prueba				Violado				Ninguna contradicción		
5	Dificultad de implementación		Muy fácil	Muy fácil	Fácil	Fácil	Fácil	Fácil	Muy complicado	Más complicado
	Número de rutinas		10	10000	7500	7500	1500 + 1500	1500 + 1500	5000 + 20,000 + 20,000	5000 + 20000 + 20000

Fuente: Estudio 1: Cuenca del Río Chaone.[26]

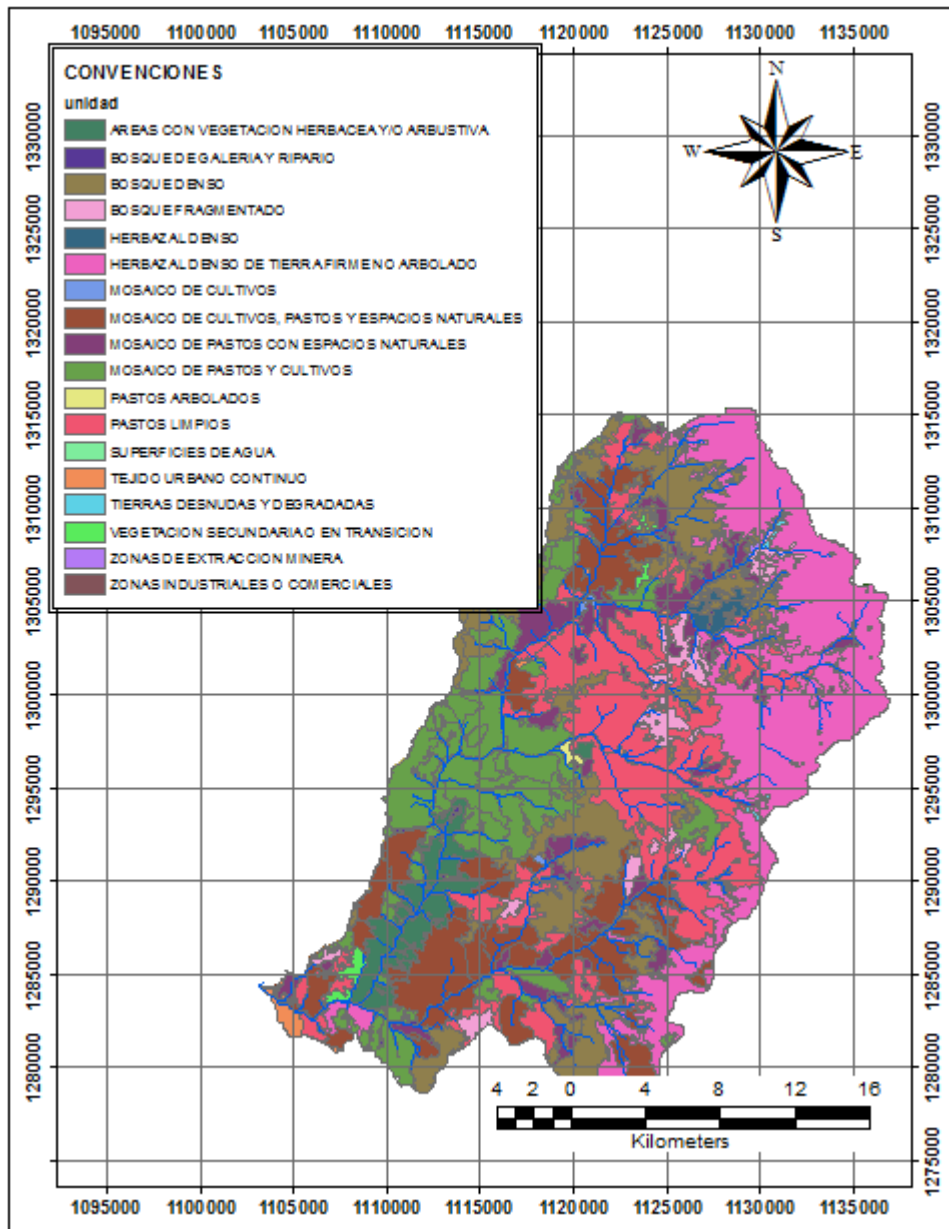
Estudio 2: Cuenca del Río Thur [15]

ANEXO F: TIPOS DE SUELO UBICADOS EN LA CUENCA DEL RIO SURATÁ



Fuente: CDMB 2016

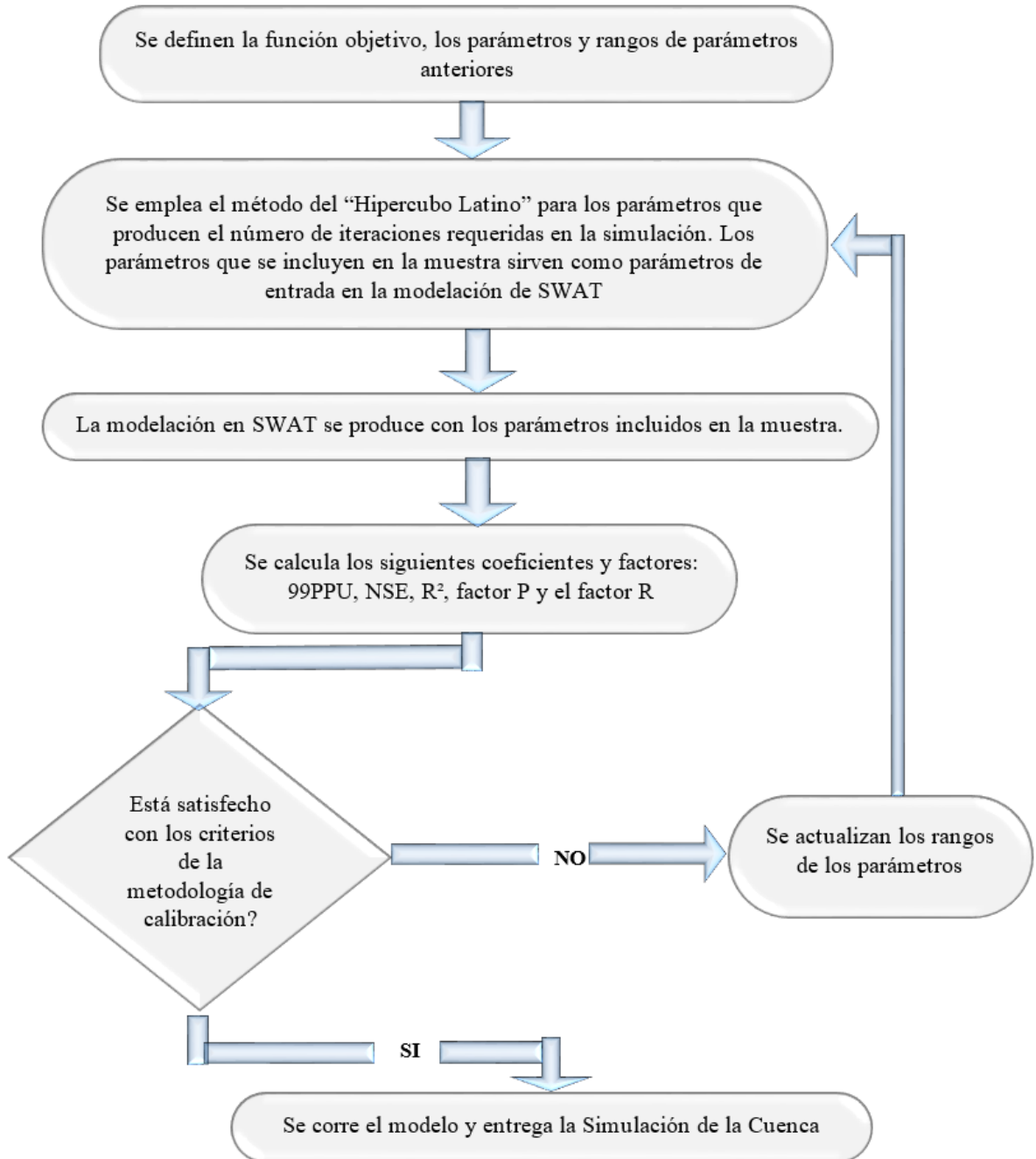
ANEXO G: USOS DEL SUELO DE LA CUENCA DEL RIO SURATÁ



Fuente: CDMB 2016

ANEXO H: ESQUEMA DE LA CALIBRACIÓN DE LA METODOLOGÍA ESCOGIDA

SUFI-2



Fuente: Documentación de SWAT CUP y Estudio realizado a la Cuenca Wenjing