

4 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN EN MODELOS HIDROLÓGICOS DISTRIBUIDOS – CASO DE ESTUDIO: RESPUESTA HIDROLÓGICA Y SEDIMENTOS - MICROCUENCA LA CHORRERA EMBALSE LA COPA

Camilo Andrés Rojas Cruz
Diego Fernando Gualdrón Alfonso

4.1 Introducción

Una cuenca hidrográfica es una unidad de área natural, que consta de un conjunto de sistemas definidos por el relieve de su terreno, en la que se forman cauces de agua, a partir de la lluvia que se tiene en esa área (Rodríguez Barrientos, 2006). Debido a su gran importancia y a la complejidad de su funcionamiento, los procesos que se desarrollan en una cuenca, tienen un alto grado de influencia en el recurso hídrico; principalmente, en las actividades antrópicas y la ocurrencia de fenómenos naturales y climáticos en esta (Briceño, Sánchez, Uzcátegui, & González, 2008). Dentro de las actividades desarrolladas por el hombre, que interfieren notablemente en el ciclo hidrológico de una cuenca, se encuentra el inapropiado uso del suelo, la deforestación, actividades agropecuarias intensivas, la invasión de ecosistemas clave en la preservación del agua (páramos, nacimientos de ríos, humedales, entre otros) (Zamboni, Sione, & Aceñolaza, 2014). Por otra parte, los movimientos de masa, sismos, sequías e inundaciones, son fenómenos altamente recurrentes, generalmente originados por causas naturales y climatológicas; los cuales afectan significativamente en la disponibilidad y oferta del recurso hídrico, trayendo consigo desabastecimiento y alteraciones en los procesos ambientales (Rodríguez Esteves, 2007).

Para ese propósito, los modelos hidrológicos se han constituido como una herramienta fundamental en la administración de cuencas hidrográficas, cuyos resultados generan grandes aportes para optimizar el entendimiento de los procesos bioló-

gicos y físico-químicos dentro de una cuenca y la manera en la que interactúan; así como aplicar el producto del modelo en el manejo y cuidado de los recursos hídricos y del medio ambiente (Graham, 2005). Los primeros modelos hidrológicos consideraron las variables del ciclo hidrológico, con valores homogéneos en el área de la cuenca (denominados modelos agregados), arrojando resultados de baja precisión en zonas con parámetros heterogéneos en cuanto a su relieve, cobertura, tipo de suelo y principales variables climatológicas; especialmente en la medición del caudal de la cuenca (Caro Camargo & Ballesteros, 2013). Debido a esto, los modelos hidrológicos fueron un tipo de herramienta que tuvo gran evolución, lo que trajo consigo el desarrollo de modelos distribuidos (a niveles de celdas) o semidistribuidos (a nivel de subcuencas), son consideradas como herramientas capaces de brindar una óptima aproximación en la simulación del ciclo del agua de una cuenca (García-Marín, y otros, 2014). Sin embargo, para su correcto funcionamiento, los modelos hidrológicos deben ser alimentados por una amplia información de variables, que describen el comportamiento de la cuenca; información que es escasa, en países que no cuentan con una adecuada instrumentación de las cuencas hidrográficas o, que cuenta con errores manuales a la hora de la toma de lectura, como, por ejemplo, la información faltante (Amaya, Restrepo-Tamayo, Vélez, Vélez, & Álvarez, 2009). Con el fin de superar estas dificultades para la modelación, se hace indispensable desarrollar las etapas de calibración y validación en los modelos hidrológicos; ya que estos procesos disminuyen la fluctuación de la estimación e interpolación de los parámetros del modelo, obteniendo la mejor parametrización para las condiciones locales (Abbott, Refsgaard 1996). De acuerdo con Sorooshian y Arfi (1982), es en el proceso de calibración, en donde se perfecciona la modelación, para su posterior uso; haciendo de esta etapa indispensable para cualquier modelo, ya que, si la calibración no está bien ejecutada, el modelo arrojará resultados falsos.

A continuación, se describen las etapas de calibración del modelo distribuido TETIS y el modelo semidistribuido SWAT, utilizado

en la Microcuenca La Chorrera (Embalse La Copa), incluyendo resultados de sedimentos y caudales, lo anterior reconociendo la importancia del ecosistema del Páramo “La Cortadera” y el uso de Sistemas de Información Geográfica.

4.2 Desarrollo

4.2.1 Modelos hidrológicos

Los modelos hidrológicos, son considerados como una herramienta capaz de brindar una aproximación al comportamiento del ciclo del agua en la cuenca de estudio (Triviño Pérez, 2004). Debido a su importante necesidad y a la alta incertidumbre en el comportamiento del clima; en las últimas décadas, se ha experimentado un gran desarrollo de los modelos hidrológicos, lo que ha contribuido al origen de una vasta variedad tipológica de estos modelos, extendiendo así su aplicabilidad (Jodar Abellan, Pla Bru, & Valdés Abellán, 2019).

Una clasificación básica de los modelos hidrológicos, se encuentra en las respuestas de su simulación. Según Campos-Aranda (2014), los modelos hidrológicos son determinísticos, al generar una única respuesta en cada simulación, iniciando con la serie de datos de los parámetros de entrada y que requiere para su alimentación; por otra parte, un modelo es considerado de tipo estocástico, cuando se obtiene un grado de incertidumbre en sus múltiples respuestas, de acuerdo con las variaciones que permite realizar a sus datos de entrada o condiciones de frontera. Por otra parte, Cabezas Calvo-Rubio (2015), establecen que, los modelos hidrológicos pueden agruparse en tres clasificaciones generales: según su finalidad o propósito de estudio; según su distribución espacial y; según su escala temporal.

Según su finalidad o propósito de estudio, los modelos hidrológicos se identifican por su estructura de cálculo, en la que se relacionan las variables de entrada y salida del modelo. Los modelos de caja negra consideran únicamente las series de las variables de entrada y salida, sin considerar la estructura causal de los procesos

de interacción entre dichas variables (Cabezas Calvo-Rubio, 2015). Por otra parte, los modelos conceptuales, son aquellos que buscan la representación del fenómeno mediante la implementación de conjuntos de elementos simples (Cabezas Calvo-Rubio, 2015). Otro tipo de modelos hidrológicos según su finalidad, son los modelos de base física, los cuales incluyen ecuaciones físicas que gobiernan el comportamiento de cada fenómeno del ciclo hidrológico; estos modelos poseen un complejo cálculo y requieren de numerosos parámetros físicos, los cuales se recopilan, generalmente, de forma experimental (Cabezas Calvo-Rubio, 2015).

Los modelos hidrológicos que se caracterizan según el grado en el que discretizan los parámetros que posee una cuenca, se pueden clasificar en modelos agregados o distribuidos (Mendoza, Bocco, Bravo, Siebe, & Ortiz, 2002). Los modelos hidrológicos agregados se identifican por asumir la precipitación de la cuenca como un parámetro de comportamiento uniforme a lo largo de su área; así, como también, se consideran las características de la cuenca, como parámetros constantes, en el transcurso del evento a analizar (Francés García & Casado, 1995). Por otra parte, los modelos hidrológicos distribuidos cuentan con la variabilidad espacial de la precipitación y de los demás parámetros de la cuenca que el modelo solicita; al mismo tiempo, estos modelos dividen la cuenca en fracciones, que según su tamaño, son conocidas como subcuencas, unidades de respuesta hidrológica o celdas (Francés García & Casado, 1995). En estas fracciones, el comportamiento de los parámetros es uniforme en el espacio. Debido a estas características, los modelos hidrológicos distribuidos consideran que la escorrentía superficial, es una variable continua en el espacio y tiempo, estableciendo una relación entre la superficie de la cuenca con esta variable y, de esta manera, simular el comportamiento real de la cuenca, con un mayor grado de proximidad (Triviño Pérez, 2004).

Teniendo en cuenta la escala temporal de simulaciones de los modelos hidrológicos, pueden ser clasificados en modelos de eventos aislados (simulación de eventos individuales, en los que se evidencia únicamente la transformación de la lluvia en esco-

rentía), modelos de procesos continuos (considera el balance hídrico de la cuenca, incluyendo los componentes de escorrentía superficial, flujos subsuperficiales y subterráneos) y, los modelos de simulación mixta (representación de ambas escalas temporales) (Weber, Jorquera, & Dasso, 2011).

4.2.1.1 Modelo hidrológico SWAT

Como modelo semidistribuido, SWAT, fue desarrollado por el Servicio de Investigación Agrícola (USDA, siglas en inglés), con el propósito de evaluar el impacto que generan las actividades agrícolas y el manejo de los recursos naturales sobre el ciclo hidrológico de la cuenca, haciendo énfasis en la variación de caudales (escorrentía superficial, flujo subterráneo, caudal base, principalmente), producción de sedimentos, durante largos períodos de tiempo (Torres-Benites, Fernández-Reynoso, Oropeza-Mota, & Mejía-Saenz, 2004). Adicional a esto, de sus múltiples usos, SWAT, ha sido implementado para evaluar la calidad del agua, cambios en el uso del suelo y su afectación en el recurso hídrico, impactos en el cambio climático sobre el agua, entre otros (Zhang, Chen, Yao, & Lin, 2015).

SWAT, posee código abierto de libre acceso, así como también, la interfaz gráfica de usuario, lo que permite que sea un modelo hidrológico altamente seleccionado para el desarrollo de una amplia variedad de proyectos hídricos y medioambientales (Muhammad, et al., 2019).

4.2.1.2 Modelo hidrológico TETIS

TETIS, es un modelo de distribución libre, desarrollado por la Universitat Politècnica de València (España), de base física, conceptual, basado en el proceso de balance hídrico; así mismo, se caracteriza por ser un modelo distribuido, el cual permite la división del área de estudio (cuenca) en celdas cuadradas, interconectadas en una red (Ocampo & Vélez, 2014). Dentro de su cálculo, el modelo TETIS, integra sus ecuaciones por medio de diferencias finitas, las cuales pueden ser modificadas por el usuario, hacién-

dolo más flexible y adaptable para un amplio campo de estudio (Francés & Bussi, 2014). Para su alimentación, los parámetros de entrada que requiere TETIS son: modelo digital de elevación, uso del suelo, tipos de suelo, tipos geológicos de la zona de estudio, datos meteorológicos (precipitación diaria, temperatura media, máxima y mínima, evapotranspiración potencial), información hidrológica y sedimentológica (escorrentía superficial y carga de sedimentos del afluente) (Li & Fang, 2017). La estructura del submodelo hidrológico, se compone de cinco tanques correspondientes al manto de nieve (T0), intercepción (T6), superficie (T2), zona capilar (T1), gravitacional (T3) y del suelo. Con esta estructura, el modelo TETIS permite representar la mayoría de los procesos hidrológicos y conocer variables, producto de estos procesos, tales como evaporación de intercepción, evapotranspiración del suelo, escorrentía directa, flujo subterráneo conectado, interflujo (Flujo presente en la región que se extiende desde la superficie hasta las capas subterráneas.), principalmente (Francés & Bussi, 2014).

Adicional a la simulación de la respuesta hidrológica de una cuenca, el modelo TETIS, se ha implementado para la simulación y predicción de crecidas, integración a sistemas de alerta temprana, permitiendo la medición en tiempo real del caudal, análisis de escenarios variados de cambio climático, cambios en el uso de suelo o cobertura vegetal, producción y transporte de sedimentos, evaluación de amenazas causadas por deslizamiento superficial de laderas, principalmente (Vélez Upegui, 2013) Adicionalmente, el modelo TETIS cuenta con un amplio registro de implementación en cuencas con áreas menores a 1Km², hasta cuencas que alcanzan áreas de aproximadamente 100 Km², permitiendo un importante rango de resolución espacial que oscila entre 30 m – 500 m; aplicándose en climas semiáridos, como en climas alpinos; arrojando satisfactorios resultados (Francés & Bussi, 2014).

4.2.1.3 Calibración en modelos hidrológicos distribuidos y semidistribuidos

Dentro de la modelación hidrológica, se hace indispensable conocer cuál es el grado de precisión y qué posee desde la

comparación entre los resultados arrojados por la simulación y los medidos en el fenómeno real. Dicha comparación, en la mayoría de los casos, evidencia algún grado de diferencia entre estos resultados, lo que conlleva a una reasignación o ajuste de los valores de las variables con las cuales se alimenta el modelo, seleccionando el valor óptimo de cada variable, para la reducción de la incertidumbre de la modelación (Vargas & Monroy, 2011). Este proceso es conocido como calibración, el cual permite el ajuste de los resultados simulados con respecto a los medidos in situ, a partir del cambio de valores de los parámetros de mayor influencia a las variables respuesta; principalmente, haciendo referencia al caudal, al ser la variable respuesta más implementada en los modelos hidrológicos para ser eje del proceso de calibración (Estrela Monreal, Cabezas Calvo-Rubio, & Estrada Lorenzo, 1999).

Según Mendoza, Bocco, Bravo, Siebe, y Ortiz (2002), el proceso de calibración en los modelos hidrológicos debe propender por ser un proceso sencillo, en el cual se pueda acceder fácilmente a los datos que sean necesarios para el desarrollo de esta fase. Si la información disponible es escasa, se recomienda hacer una selección reducida de variables a modificar para la calibración del modelo.

Los modelos hidrológicos distribuidos, disponen generalmente de dos tipos de procesos de calibración: calibración manual o calibración automática (Vélez Upegui, 2013). La calibración manual tradicional, se implementa generalmente con la metodología de ensayo y error, para lo cual, se requiere de un amplio conocimiento de la cuenca de estudio y de los parámetros a ajustar; de esta manera, se podrán obtener resultados confiables en poco tiempo (Vélez, Puricelli, López Unzu, & Francés, 2009). En el proceso de calibración automática, cada uno de los parámetros se modifica por valores comprendidos en rangos asignados por el analista y experto en los procesos simulados; siendo estos rangos, valores lógicos y coherentes a la zona de estudio (Vélez Upegui, 2013). Sin embargo, para la ejecución de cualquier tipo de calibración, se recomienda elaborar un análisis de sensibilidad, por medio del cual se identifican los parámetros de entrada, que al modificarlos,

se observa un notorio cambio en la variable respuesta (p.ej. la escorrentía superficial); lo anterior, permite que el proceso de calibración sea rápido y se centre en un grupo significativo de parámetros (Alighalehbabakhania, et al., 2017). Este análisis puede ser de forma manual o automática, al igual que el proceso de calibración.

El proceso de calibración finaliza en el momento en el que se obtenga una gran similitud entre el comportamiento de las variables simuladas con las variables observadas en la zona de estudio. Generalmente, la variable más utilizada para el proceso de calibración, es la de escorrentía superficial; que compara la lectura de caudal de las estaciones limnimétricas ubicadas en la cuenca, con los caudales simulados por el modelo, en los mismos puntos en donde se encuentran dichas estaciones (Amaya, Restrepo-Tamayo, Vélez, Vélez, & Álvarez, 2009).

Para determinar la similitud entre los valores simulados vs los valores medidos, es importante estimar el índice de error de estas dos series. Los índices de eficiencia y rendimiento más comunes en el proceso de calibración son: Raíz del error cuadrático medio (RMSE-Root Mean Square Error) (ec.1), índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) (ec.2), el sesgo porcentual (PBIAS-Percent BIAS) (ec.3), coeficiente de determinación R2 (ec.4), principalmente (Lvyang Xiong, Xu Xu, Dongyang Ren, Quanzhog Huang, & Guanhua Huang, 2019).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - p_i)}{N}} \quad (1)$$

$$NSE = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}_i)^2}} \quad (2)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - p_i)^2}{\sum_{i=1}^n p_i} \times 100 \quad (3)$$

$$R_2 = \frac{SSR}{SST} \quad (4)$$

Donde O_i es el caudal observado (medido en una estación limnométrica o limnigráfica), p_i es el caudal simulado, $(O_i)^-$ representa el caudal medio observado, N es el número total de días del periodo de calibración, SST es la suma total de cuadrados y SSR es la suma de cuadrados debida a la regresión.

Para considerar una modelación aceptable, los valores de los índices de error recomendables son los siguientes: RMSE, valor óptimo = 0 (Pouladi, Afshar, Afshar, Molajou, & Farahmand, 2019; NSE > 0.5, valor óptimo = 1 (Biancamaria, y otros, 2019; Jin, Jin, Yuan, & Mao, 2019); PBIAS < 25%, valor óptimo = 0% (Biancamaria, y otros, 2019; Jin, Jin, Yuan, & Mao, 2019); $R_2 > 0.5$, valor óptimo = 1 (Muhammad, y otros, 2019).

Posterior a esta etapa, se encuentra la fase de validación, la cual permite confirmar la proximidad de la modelación a la realidad, a través de su implementación con otros datos de entrada, correspondientes a otro periodo de tiempo; el cual recomienda Palacio (2002) que sea un periodo largo y continuo (sin interrupciones en su secuencia temporal). Esto permite identificar que el modelo hidrológico calibrado, permitirá hacer predicciones de comportamientos como la escorrentía superficial, más acertados, ante eventos inesperados como fenómenos del ENSO (Palacio, García, & García, 2010).

4.2.1.4 Calibración del modelo SWAT

El modelo SWAT posee una herramienta para el proceso de calibración SWAT-CUP (programas de calibración e incertidumbre de SWAT), en la cual, el usuario puede realizar una calibración automática, a partir de la selección de sus algoritmos de calibración: SUFI-2 (ajuste de incertidumbre secuencial), GLUE (estimación de incertidumbre de probabilidad generalizada), ParaSol (solución de parámetros), McMc (análisis de cadena

Markov Chain Monte Carlo) y PSO (optimización de enjambre de partículas) (Shivhare, Singh Diskhit, & Bihari Dwivedi, 2018).

El algoritmo SUFI-2, permite identificar diversos tipos de incertidumbres considerando las diferentes fuentes posibles, como, las variables entrada del modelo, la conceptualización del modelo, los parámetros se tienen en cuenta en los procesos hidrológicos (Wu & Chen, 2015). Este algoritmo asigna la incertidumbre en la salida del modelo desde la incertidumbre de predicción del 95% de incertidumbre en la predicción. Finalmente, la incertidumbre general en la salida es cuantificada con la incertidumbre de predicción del 95%, la cual se estima en el rango de 2.5% - 97.5% de la distribución acumulativa de las variables de salida, por medio del muestreo del latín de hipercubos (Jang, Engel, & Ryu, 2018). SUFI-2 utiliza dos índices para medir el rendimiento de la calibración y del análisis de incertidumbre: factor P, el cual indica el porcentaje de datos que se encuentra entre la banda del 95%, cuyo valor máximo es de 100% y, factor R, indicador del ancho promedio de banda dividida por la desviación estándar de la variable medida (Abbaspour, Faramarzi, Ghasemi, & Yang, 2009). Los valores óptimos de estos factores son $P = 1$ y $R = 0$ (Abbaspour, Faramarzi, Ghasemi, & Yang, 2009). Adicional a estos factores, SUFI-2 cuenta con t-stat, considerado como un índice de precisión con el que se mide el coeficiente de regresión; con este índice, se determina que un parámetro es “sensible” para el modelo, cuando su valor es mayor que el error estándar (Mehan, Neupane, & Kumar, 2017).

De acuerdo con Wu & Chen (2015), GLUE, es un algoritmo de calibración que considera un conjunto de parámetros óptimos globales y no un único valor global óptimo. Para ello, GLUE, evalúa cualquier incertidumbre presente en los parámetros, teniendo como referencia el valor óptimo de los parámetros (Wu & Chen, 2015). Este algoritmo arroja la incertidumbre en intervalos de predicción, considerando los límites más altos y más bajos de predicción (Wu & Chen, 2015).

El algoritmo ParaSol trabaja desde del cálculo de optimización SCE-UA (Shuffled Complex Evolution de la Universidad de Arizona), herramienta que posee una técnica de optimización efectiva y eficiente para la calibración de los modelos hidrológicos (Duan, Sorooshian, & Gupta, 1994). Posterior a esto, ParaSol construye una predicción, llevando a cabo la suma de los cuadrados de los residuos, de acuerdo al número de variables medidas y las variables simuladas (Shivhare, Singh Diskhit, & Bihari Dwivedi, 2018).

McMc, es un algoritmo de influencia bayesiana para la estimación del error autorregresivo de tiempo continuo, poco seleccionado en la calibración SWAT-CUP (Yang, Reichert, & Abbaspour, 2007). El algoritmo McMc, requiere de periodos largos de ejecuciones de más de 20.000 iteraciones para el completo desarrollo del algoritmo y la obtención de inmejorables resultados; esto hace que se requiera una mayor capacidad computacional (Joseph & Guillaume, 2013).

El algoritmo PSO, permite la obtención de las coordenadas de parámetros, con su respectiva velocidad y direccionamiento, con esta información, el algoritmo actualiza la velocidad de cada parámetro, generando el mejor valor de cada parámetro y el mejor valor global; finalmente, se estima una nueva posición del parámetro, teniendo en cuenta la posición inicial más la velocidad actual (Zhang, Srinivasan, Zhao, & Van Liew, 2008).

→ **Parámetros de sensibilidad:**

En una calibración con metodología prueba y error (calibración manual), cuyo objeto de estudio es la escorrentía superficial, los parámetros de mayor grado de sensibilidad son: CN2 (Número de curva de la subcuenca en condición AMCII), SOL_AWC (capacidad de agua disponible), ESCO (factor de compensación de la evaporación del suelo), SOL_Z (profundidad de la capa del suelo), SOL_K (conductividad hidráulica del suelo saturado), ALPHA_BF (coeficiente de recesión de escorrentía base), CH_N2 (coeficiente

de dotación para el canal principal) (Pereira, Martínez, Pruski, & da Silva, 2016).

Si por el contrario, la calibración es de tipo automática, implementando la herramienta SWAT-CUP, desarrollando un método de calibración simultáneo o secuencial con el algoritmo SUFI-2, los parámetros de sensibilidad propuestos por Mattos Brighenti, y otros (2018), para la escorrentía superficial son: GWQMN.gw, GW_REVAP.gw, CN2.mgt, CH_S2.rte, CH_N2.rte, CH_K2.rte, principalmente.

Un escenario de gran relevancia de estudio, son los periodos de comportamientos extremos del clima: lluvia y sequía, los que presentan una mayor complejidad en el proceso de calibración. De acuerdo con Zhang, Chen, Yao, & Lin (2015), se obtienen mejores resultados de calibración y ajuste del modelo, al vincular la herramienta SWAT-SC (calibración estacional de SWAT), en comparación a los resultados que arroja SWAT, ante estos escenarios. Con SWAT-SC, fue posible obtener los parámetros de sensibilidad que permitieron el ajuste tanto en los periodos húmedos como en los periodos secos: CN2, ALPHA_BF, GW_REVAP, ESCO, ALPHA_BNK, CH_N2, CH_K2, SOL_AWC, SOL_K y SOL_BD. Dichos parámetros presentan modificaciones en sus valores, de acuerdo con el periodo de estudio (Zhang, Chen, Yao, & Lin, 2015).

4.2.1.5 Calibración del modelo TETIS

El proceso de calibración de modelos hidrológicos distribuidos, posee un grado de complejidad mayor en comparación a los modelos semidistribuidos y agregados. Para el desarrollo de la etapa de calibración del modelo TETIS, se deben estimar los mapas de los parámetros, comenzando con la información que se cuenta disponible; dentro de estos mapas se encuentra el modelo digital de elevación (DEM, siglas en inglés), red de drenaje (obtenido a partir del DEM), dirección de drenaje, pendiente, velocidad de ladera, mapa de cobertura del suelo y mapa geológico (Francés & Bussi, 2014). Los mapas de dirección de flujo, pendiente y velocidad de ladera, se derivan de la información obtenida del mapa de red de drenaje (Francés & Bussi, 2014). Teniendo en cuenta la información que contiene cada uno de estos mapas, es posible

obtener el mapa de coberturas para efectos de evapotranspiración, capacidad de infiltración, almacenamiento estático y de permeabilidad del sustrato (Francés & Bussi, 2014).

Luego de la obtención de los mapas, se procede con el proceso de calibración, el cual se simplifica, con la combinación del modelo método de optimización automática SCE-UA (Shuffled Complex Evolution de la Universidad de Arizona); el cual permite la reducción del número de variables a calibrar, arrojando como resultado un pequeño grupo de factores de corrección óptima, comunes en cada celda, permitiendo conservar su variabilidad espacial (Francés, Vélez, & Vélez, 2007). Generalmente, es posible la calibración del modelo con un número de 9 variables; no obstante, es posible agregar más variables, según se requiera en el estudio (Morales de la Cruz & Francés, 2008). De acuerdo con Francés & Bussi (2014), tanto el proceso de calibración como el de validación, brindan alto grado de confiabilidad en los resultados obtenidos de la modelación.

→ **Parámetros de sensibilidad:**

Los parámetros de sensibilidad, varían de acuerdo a la zona de estudio y el propósito de la modelación. De acuerdo con Francés, Vélez y Vélez (2007), el proceso de calibración y validación es satisfactorio, con un grupo de únicamente 9 parámetros; dentro de estos parámetros, se tiene máximo almacenamiento estático, índice de cobertura vegetal para el mes m , capacidad de infiltración, velocidad de escorrentía superficial, capacidad de filtración, velocidad de flujo, capacidad de salida de agua subterránea, velocidad de flujo base, velocidad del canal en el día t (Francés, Vélez, & Vélez, 2007) Por otra parte, según Francés (2012), para la calibración de la escorrentía superficial, el modelo TETIS, requiere la calibración de los siguientes parámetros: almacenamiento estático, evapotranspiración, velocidad de escorrentía directa, velocidad de onda cinemática, tasa de infiltración, tasa de percolación, velocidad de flujo interno, base velocidad de flujo y tasa de percolación profunda.

4.3 Modelo hidrológico SWAT en la determinación de la respuesta hidrológica de la microcuenca La Chorrera

4.3.1 Localización

Con un área de 66.77 Km², la microcuenca “La Chorrera” (Figura 39), se localiza entre los municipios de Toca y Tuta, limita por el oriente con el Municipio de Pesca y por el occidente con el municipio de Toca, particularmente con el embalse de La Copa, al cual coincide con el punto la salida de la microcuenca. Hidrográficamente, el río La Chorrera, pertenece a una unidad hidrológica orden III, fuente abastecedora de la subcuenca del Río Tuta (orden II), con patrón de drenaje dendrítico y longitud de drenaje de 192.84 kilómetros.

Figura 39. División político administrativa; Municipios microcuenca “La Chorrera”- Distribución de subcuencas en ARCSWAT



Nota. Adaptado De 01_Localización_General_100.Mxd Pomca 2018. Uptc - Determinación De La Respuesta Hidrológica De La Microcuenca La Chorrera Debido A Actividades Agrícolas Y Ganaderas 2019.

4.3.2 Coberturas Vegetales

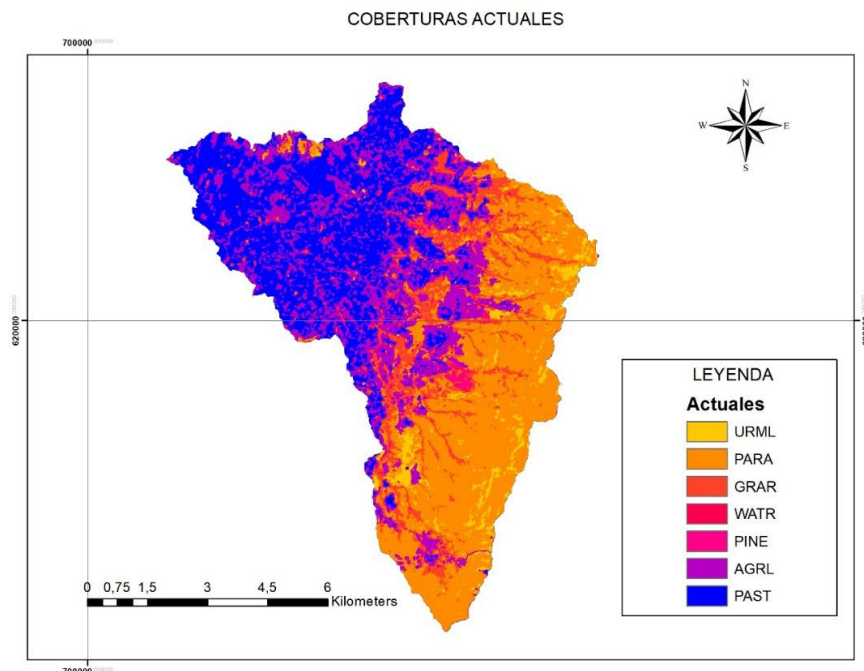
Se presentan 7 coberturas diferentes, determinadas según la metodología CORINE land cover (Figura 40) y destacando mayor presencia de pastos, actividades de agricultura y la zona correspondiente al Páramo “La Cortadera”, con presencia de vegetación nativa de páramo y pastos.

Tabla 21. Caracterización coberturas vegetales microcuenca La Chorrera

DESCRIPCIÓN	REFERENCIA	ÁREA [HA]	ÁREA%
Residential-Med/Low Density	URML	255.39	3.83
Páramo	PARA	2277.26	34.15
Grarigue	GRAR	695.91	10.44
Water	WATR	2.73	0.04
Pine	PINE	33.35	0.5
Agricultural Land-Generic	AGRL	1559.23	23.38
Pasture	PAST	1844.45	27.66

Nota. Tomado De Uptc - Determinación De La Respuesta Hidrológica De La Microcuenca La Chorrera Debido A Actividades Agrícolas Y Ganaderas 2019.

Figura 40. Representación coberturas actuales microcuenca La Chorrera, ArcGis



Nota. Tomado De Uptc - Determinación De La Respuesta Hidrológica De La Microcuenca La Chorrera Debido A Actividades Agrícolas Y Ganaderas 2019.

4.3.3 Meteorología

La interfaz requiere la incorporación de registros diarios multianuales, abarcando variables climáticas como precipitación, humedad, radiación solar, velocidad del viento, y temperaturas mínimas y máximas. Para garantizar la continuidad y la integridad de todos los procesos, es altamente recomendable la aplicación de métodos para completar las series de datos que presenten valores faltantes. (estadísticos como el método de regresión lineal múltiple para el caso de temperaturas y razón normal para precipitaciones), así como el análisis de datos atípicos mediante análisis de doble masa y boxplot o cajas y bigotes; de acuerdo a lo anterior, y con la finalidad de calibrar y validar el modelo, se seleccionan años que no presentaran fenómenos de variabilidad climática.

Posteriormente y partiendo del modelo de elevación digital y utilizando Sistemas de Información Geográfica para el preprocesamiento de capas geospaciales, SWAT, delimita una cuenca hidrográfica en subcuencas que se subdividen a su vez en áreas de tipo de suelo homogéneo en HRU, las cuales se utilizan para simular procesos que ocurren a escala de balance hidrológico y cantidad de agua, pastos, crecimiento de plantas, erosión y ciclos de nutrientes y sedimentos que fluyen desde las HRU hacia los arroyos (Sheshukov A, 2015); En el caso de la microcuenca La Chorrera, se definen 21 subcuencas (Figura 39) y 168 Unidades de respuesta hidrológica.

4.3.4 Características Químicas de Suelos - Ecuación Universal de Pérdida de Suelo

Considerando las 6.668 ha y siguiendo la taxonomía y condiciones de pendiente, clima, paisaje, así como las características físico-químicas, se identificaron 20 unidades cartográficas (Tabla 22), identificando un 56.76% en las unidades Andic Dystrustepts y Typic Humudepts y las referencias AMVd1 y AMHa, en zonas del Páramo La Cortadera.

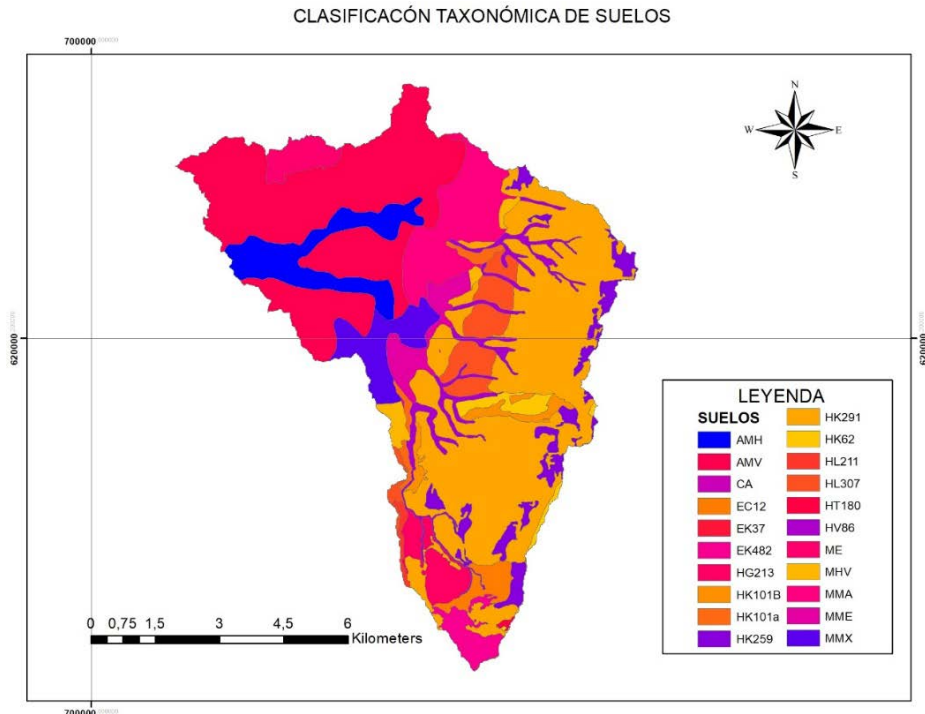
Siguiendo la caracterización físico química establecida en el estudio de zonificación de tierras del departamento de Boyacá (IGAC, 2005), y a partir del contenido de carbono orgánico en el suelo (%) o SOL_CBN como parámetro en la interfaz SWAT, fue posible determinar el porcentaje de materia orgánica y finalmente, obtener el factor de Erodabilidad de acuerdo a las ecuaciones de Williams (1995), tomando las características químicas de porcentaje de arcilla, limo, arena y fragmentos de roca en el suelo (Figura 41).

Tabla 22. *Nomenclatura unidades taxonómicas y áreas dentro de la microcuenca La Chorrera*

UNIDAD TAXONÓMICA	SÍMBOLO	ÁREA [HA]	ÁREA%
Aeric Endoaquepts	AMHa	384.44	5.76
Andic Dystrustepts	AMVd1	1675.02	25.11
Lithic Haplocryands	EC12	95.05	1.42
Lithic Cryorthents	EK37	0.89	0.01
Lithic Haplocryands	EK482	115.93	1.74
Pachic Humudepts	HG213	159.73	2.39
Entic Humudepts	HK101a	57.82	0.87
Fluventic Humudepts	HK101B	89.39	1.34
Typic Endoaquerts	HK259	280.39	4.2
Typic Humudepts	HK291	2111.06	31.65
Fluventic Humudepts	HK62	87.78	1.31
Typic Humudepts	HL211	23.29	0.35
Andic Humudepts	HL307	289.34	4.33
Typic Melanudands	HT180	5.7	0.09
Aquic Humudepts	HV86	256.75	3.85
Aeric Endoaquepts	ME	122.46	1.83
Typic Hapludands	MHVe	69.18	1.04
Lithic Dystrustepts	MMAF1	444.03	6.65
Humic Dystrustepts	MMEg	159.68	2.39
Typic Haplustalfs	MMXe1	240.43	3.6
	TOTAL	6668.36	100

Nota. Tomado de UPTC - determinación de la respuesta hidrológica de la microcuenca La Chorrera debido a actividades agrícolas y ganaderas 2019.

Figura 41. Mapa de Taxonomía de suelos Microcuenca La Chorrera



Nota. Tomado de UPTC - determinación de la respuesta hidrológica de la microcuenca La Chorrera debido a actividades agrícolas y ganaderas 2019.

En la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE), el factor de erosionabilidad del suelo (K) corresponde a los efectos colectivos de la susceptibilidad al desprendimiento del suelo y la transportabilidad de sedimentos, así como la tasa y cantidad de escorrentía bajo una erosividad de lluvia determinada. Sobre la base de la ecuación USLE, K es sensible al porcentaje de materia orgánica, a la permeabilidad del suelo y al tamaño de partículas (Wawer R. 2005), la erodabilidad en el suelo se puede calcular a partir de la ecuación:

$$KUSLE = f_{csand} * f_{cl-SI} * f_{orgc} * f_{hisand} \quad (5)$$

$$f_{csand} = \left(0,2 + 0,3 * \exp \left(-0,256 * ms * \left(1 + \frac{msilt}{100} \right) \right) \right) \quad (6)$$

$$f_{cl-SI} = \left(\frac{msilt}{mc+msilt} \right)^{0,3} \quad (18)$$

$$f_{orgc} = \left(1 - \frac{0,256*orgc}{orgc+\exp(3,72-2,95*orgc)} \right) \quad (7)$$

$$f_{hisand} = \left(1 - \frac{0,7 * \left(1 - \frac{ms}{100} \right)}{\left(1 - \frac{ms}{100} \right) + \exp \left(-5,51 + 22,9 * \left(1 - \frac{ms}{100} \right) \right)} \right) \quad (8)$$

Fcsand, corresponde al Factor de erodabilidad para suelos de arena, el cual corresponde a un valor que reduce el indicador de K en suelos con alto contenido de arena gruesa; fcl-SI (Factor de erodabilidad para suelos de arcilla y limo) obtiene bajos factores de erosionabilidad del suelo para suelos con altas proporciones de arcilla a limo; Forgc (Factor de erodabilidad para suelos con alto contenido de carbono orgánico) reduce los valores de K en suelos con alto contenido de carbono orgánico, mientras que, fhisand (Factor de erodabilidad para suelos con altos contenidos de arena) reduce los valores de K para suelos con contenido de arena extremadamente alto; ms corresponde al porcentaje del contenido de arena, msilt al porcentaje contenido de limo, mc al contenido de arcilla y orgC al porcentaje contenido de carbono orgánico (Wawer R. 2005). De acuerdo con los parámetros físico-químicos, y aplicado a las unidades cartográficas, se obtienen los factores de erodabilidad para la microcuenca (Tabla 23).

Tabla 23. Factor K de Erodabilidad del Suelo – Microcuenca La Chorrera Embalse La Copa

UNIDAD TAXONÓMICA	Numero de horizontes	SOL_Z Profundidad de cada horizonte (mm)		f csand	f cl - si	f org C	f hisand	USLE_K factor de erodabilidad del suelo (0,013 t*m2*hr/m3*t*cm)
Andic Dystrustepts	1	0	230	0.20	0.81	0.97	1.00	0.16
	2	230	580	0.20	0.79	0.97	1.00	0.15
	3	580	1100	0.20	0.76	0.97	1.00	0.15
	4	1100	1500	0.20	0.65	0.99	1.00	0.13
Aeric Endoaquepts	1	0	180	0.20	0.82	0.97	1.00	0.16
	2	180	230	0.20	0.83	0.97	1.00	0.16
	3	230	420	0.20	0.83	0.97	1.00	0.16
	4	420	580	0.20	0.82	0.97	1.00	0.16
	5	580	800					
	6	800	1300					
Aeric Endoaquepts	1	0	100	0.20	0.78	0.98	1.00	0.15
	2	100	150	0.20	0.78	0.99	1.00	0.15
	3	150	270	0.22	0.73	0.99	1.00	0.16
	4	270	330					
	5	330	400					
Typic Hapludands	1	0	160	0.20	0.86	0.98	1.00	0.17
	2	160	350	0.20	0.86	0.98	1.00	0.17
	3	350	680	0.20	0.81	0.98	1.00	0.16
	4	680	910					
	5	910	1500					
Lithic Dystrustepts	1	0	100	0.21	0.80	0.98	1.00	0.16
	2	100	120	0.21	0.80	0.99	1.00	0.16
	3	120	270	0.22	0.79	0.99	1.00	0.17
	4	270	320					
	5	320	410					

UNIDAD TAXONÓMICA	Numero de horizontes	SOL_Z Profundidad de cada horizonte (mm)		f csand	f cl - si	f org C	f hisand	USLE_K factor de erodabilidad del suelo (0,013 t*m ² *hr/m ³ *t*cm)
Typic Haplustalfs	1	0	100	0.20	0.81	0.98	1.00	0.16
	2	100	220	0.20	0.81	0.98	1.00	0.16
	3	220	540	0.23	0.77	1.00	1.00	0.18
	4	540	960					
	5	960	1050					
Humic Dystrustepts	1	0	200	0.20	0.77	0.97	1.00	0.15
	2	200	250	0.20	0.73	0.97	1.00	0.14
	3	250	400	0.20	0.73	0.97	1.00	0.14
	4	400	580	0.20	0.73	0.97	1.00	0.14
	5	580	690	0.20	0.71	0.97	1.00	0.14
	6	690	860					
	7	860	1300					
Lithic Haplocryands	1	0	110	0.20	0.85	0.97	1.00	0.17
Lithic Haplocryands	1	0	400	0.20	0.95	0.97	0.95	0.17
Pachic Humudepts	1	0	100	0.20	0.79	0.97	1.00	0.15
	2	100	190	0.20	0.79	0.97	1.00	0.15
	3	190	220	0.20	0.79	0.97	1.00	0.15
	4	220	350	0.20	0.79	0.97	1.00	0.15
	5	350	550	0.24	0.62	0.97	1.00	0.14
Entic Humudepts	1	0	180	0.20	0.80	0.97	1.00	0.16
Fluventic Humudepts	1	0	190	0.21	0.93	0.97	1.00	0.19
	2	190	410	0.21	0.92	0.97	1.00	0.19
	3	410	580	0.21	0.88	0.98	1.00	0.18
	4	580	900	0.21	0.85	1.00	1.00	0.18
Typic Endoaquerts	1	0	140	0.39	0.70	0.97	1.00	0.27
	2	140	320	0.44	0.67	0.97	1.00	0.28
	3	320	750	0.46	0.68	1.00	1.00	0.32
	4	750	1010	0.49	0.81	0.98	1.00	0.39
	5	1010	1200	0.39	0.66	0.98	1.00	0.25

UNIDAD TAXONÓMICA	Numero de horizontes	SOL_Z Profundidad de cada horizonte (mm)		f csand	f cl - si	f org C	f hisand	USLE_K factor de erodabilidad del suelo (0,013 t*m ² *hr/ m ³ *t*cm)
Typic Humudepts	1	0	250	0.20	0.83	0.97	1.00	0.16
	2	250	370	0.20	0.79	0.98	0.99	0.15
	3	370	500	0.20	0.71	1.00	0.98	0.14
Fluventic Humudepts	1	0	210	0.20	0.77	0.97	1.00	0.15
	2	210	330	0.24	0.74	0.98	1.00	0.17
	3	330	650	0.27	0.74	1.00	1.00	0.20
	4	650	1100	0.20	0.84	1.00	1.00	0.17
Typic Humudepts	1	0	320	0.24	0.84	0.98	1.00	0.19
	2	320	520	0.26	0.84	1.00	1.00	0.22
	3	520	900	0.30	0.79	1.00	1.00	0.24
Andic Humudepts	1	0	240	0.20	0.81	0.98	1.00	0.16
	2	240	360	0.20	0.83	0.99	1.00	0.17
	3	360	560	0.20	0.89	0.99	1.00	0.18
	4	560	1100	0.29	0.99	1.00	1.00	0.29
Typic Melanudands	1	0	490	0.21	0.83	0.97	1.00	0.17
	2	490	1200	0.23	0.73	1.00	1.00	0.17
Lithic Cryorthents	1	0	80	0.20	0.87	0.97	1.00	0.17
Aquic Humudepts	1	0	100	0.20	0.92	0.98	1.00	0.18
	2	100	360	0.20	0.92	0.99	1.00	0.18
	3	360	600	0.20	0.92	1.00	1.00	0.18
	4	600	880	0.20	0.89	1.00	1.00	0.18
	5	880	1100	0.20	0.79	1.00	0.44	0.07

Nota. Autor.

Considerando los resultados obtenidos por el Servicio de conservación de Suelos (ARS, 1975) y el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC, 2005), la unidad taxonómica Andic Dystrustepts, presenta textura arcillo arenosa, la cual coincide con los porcentajes de arcilla identificados hasta los 1,5 metros de profundidad, encontrado en topografía plana, los suelos Éric Endoaquepts,

corresponden a texturas franco arcillosas e inclusión de roca entre los 0.18 y 0.42 metros para la clasificación de suelo AMHa y hasta los 0.4 metros para Misceláneo erosionado con presencia de roca, la unidad Typic Hapludands presenta textura arcillosa (con valores entre 0.13 y 0.29 para contenidos de materia orgánica entre el 2 y el 4%), a diferencia de la unidad anterior la taxonomía identificada como Lithic Dystrustepts incluye porcentajes de grava mayores en profundidades superiores a los 0.3 metros y mayor cantidad de arcilla en la totalidad de horizontes.

La unidad Typic Haplustalfs, contiene porcentajes menores de materia orgánica, especialmente, en los últimos estratos, comprendiendo texturas tipo arena fina y arcilla arenosa para suelos con porcentajes superiores en arcilla y con presencia de fragmentos de roca, el suelo Humic Dystrustepts, comprende texturas franco arcillosa y arcillosa sin la presencia de gravas; en el caso de la unidad Lithic Haplocryands exhibe porcentajes altos de arena, la unidad taxonómica Pachic Humudepts incluye porcentajes altos de arena hasta los 0.35 metros y superiores en arcilla hasta 0.55 metros, los suelos Entic Humudepts, contienen porcentajes de materia orgánica “muy altos” o superiores al 6% (IGAC 2015) y sin la presencia de roca. A diferencia de los suelos anteriores, en la taxonomía Fluventic Humudepts, predominan los porcentajes de limo en el suelo para los horizontes pertenecientes a la unidad HK101A, para el caso de las 89.39 hectáreas de la unidad HK62 predomina los porcentajes de arcilla en el suelo, especialmente entre los 0.33 y 0.65 metros; La unidad Typic Endoaquerts comprende la mayor erodabilidad en relación a los suelos de la microcuenca, incluyendo porcentajes altos de arcilla hasta los 1.2 metros de profundidad y textura arcillo limosa; los suelos Typic Humudepts, Typic Melanudands y Lithic Cryorthents contienen texturas arcillo arenosas con bajo contenido de gravas. Finalmente, la Aquic Humudepts, se caracteriza por tener contenidos de materia orgánica inferiores a las demás unidades, predominando texturas arcillo arenosas y arenas finas.

4.3.5 Outputs

Complementario a caudales simulados, la interfaz SWAT, permite identificar resultados en cuanto a rendimiento de sedimentos (mg/L), Nitrógeno orgánico en la escorrentía, Rendimiento de Fósforo orgánico, Fósforo mineral transportado con el agua, entre otros, los cuales se relacionan a medidas y estrategias de gestión, hidrología y manejo del recurso hídrico.

Para el caso de estudio y considerando el proceso de calibración para el periodo 2003 – 2007, se obtiene un coeficiente de determinación con ajuste “aceptable” entre caudales observados y obtenidos por el programa; el coeficiente NASH se clasifica como “satisfactorio”, generando niveles aceptables de rendimiento y en términos de PBIAS desempeño “Muy Bueno”; procedimiento obtenido con el programa SWAT CUP (mediante modelos de ajuste de incertidumbre secuencial con enfoque semiautomático).

Tabla 24. Resultados Calibración del modelo. Comparación de coeficientes de desempeño estadístico

Desempeño en la calibración (2003 a 2007)		
R2	NASH	PBIAS
0.63	0.62	-0.19

Nota. Tomado de “Determinación de la Respuesta Hidrológica de la Microcuenca La Chorrera Embalse “La Copa” debido a actividades agrícolas y ganaderas” (2019).

4.3.6 Análisis de Sensibilidad

Para casos de calibración y validación, se consideran los coeficientes prueba “t” y valor “p”, siguiendo los parámetros de modelado hidrológico sensibles al flujo para la cuenca estudiada; de acuerdo a lo anterior, los parámetros que presentan mayor sensibilidad son el caudal base (ALPHA_BF.gw), capacidad de agua disponible del suelo (SOL_AWC (.). Sol), conductividad hidráulica efectiva en el aluvión del canal principal mm / hr (CH_K2.rte), Tiempo de retardo del agua subterránea (GW_DELAY) y Umbral

de profundidad del agua en el acuífero poco profundo requerido para que se produzca el flujo de retorno (Rojas Cruz, C. 2019).

En el estudio se obtienen finalmente los desempeños de coeficiente para el periodo comprendido entre los años 2007 a 2011:

Tabla 25. Resultados Calibración del modelo. Comparación de coeficientes de desempeño estadístico

Desempeño en la validación (2008 a 2011)		
R2	NASH	PBIAS
0.61	0.59	-0.43

Nota. Tomado de “Determinación de la Respuesta Hidrológica de la microcuenca La Chorrera Embalse La Copa” debido a actividades agrícolas y ganaderas” (2019).

La propuesta no incluye la modificación de coberturas, obteniendo eficiencia satisfactoria de acuerdo al coeficiente NASH, aceptable en R2 y desempeño muy bueno en PBIAS, resultados inferiores a la calibración.

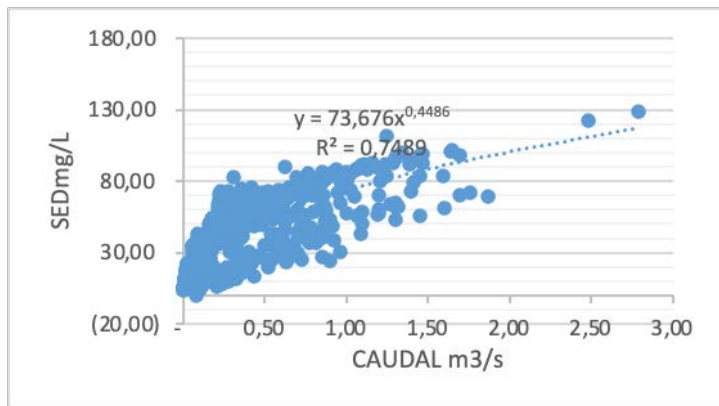
Sedimentos:

Es recurrente encontrar que el incremento de caudales alcance umbrales superiores en ríos, eventos presentes en el ciclo hidrológico y los cuales son eficientes en los propósitos de transportar flujo, sedimentos y nutrientes (Ollero 2014); aguas abajo, y en el caso de embalses, pueden constituir problemas para las características químicas y físicas de la calidad del agua (Alemayehu et al., 2014). De manera física, los sedimentos afectan la vida útil de los embalses y deterioran la calidad estética del medio ambiente; químicamente, funcionan como un medio de distribución para ciertas toxinas (Alemayehu et al., 2014); de igual manera, la sedimentación en embalse aumenta el riesgo de escurrimiento de agua durante las inundaciones, reduce la calidad del agua consumida y disminuye el volumen de agua del embalse.

Partiendo de los datos obtenidos por el programa, se relaciona el caudal o rendimiento de sedimentos conforme a las Unidades

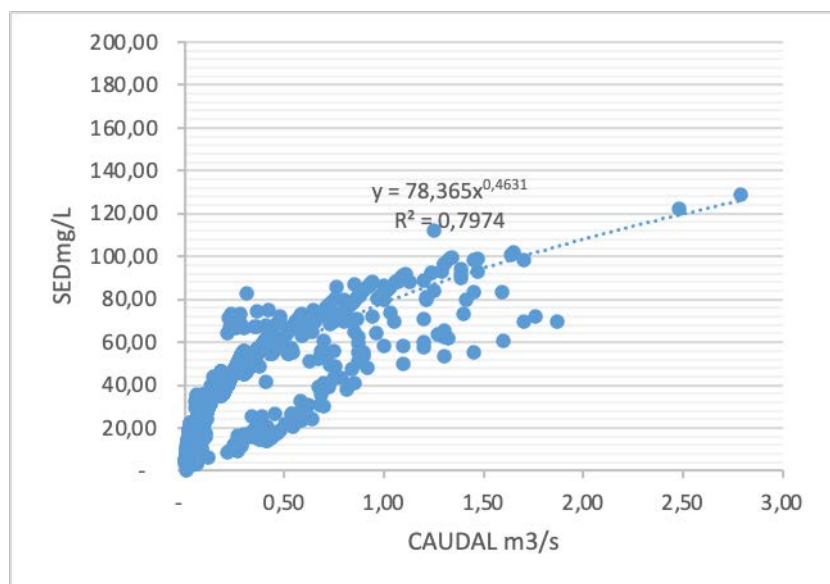
de respuesta hidrológica para simulación, en este caso, se toman resultados diarios sin calibrar y bajo periodos de calibración (26 de julio de 2003 a 24 de julio de 2007) y validación (del 25 de julio de 2007 al 23 de abril de 2011), tomando el mejor desempeño de acuerdo a los coeficientes estadísticos entre caudales aforados y simulados; considerando lo anterior, la calidad de ajuste presenta un valor $R^2=0.749$ (Gráfica 8) bajo línea de tendencia potencial, y con caudales máximos de 2.8 m³/s.

Gráfica 8. Relación, caudales y sedimentos sin calibración



Nota. Relación caudales y sedimentos sin calibración, periodo 26/07/2003 – 24/07/2007

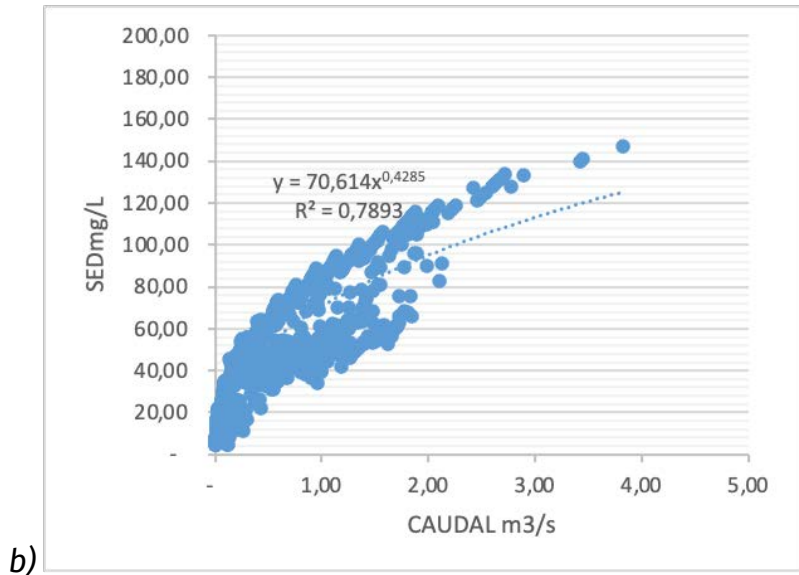
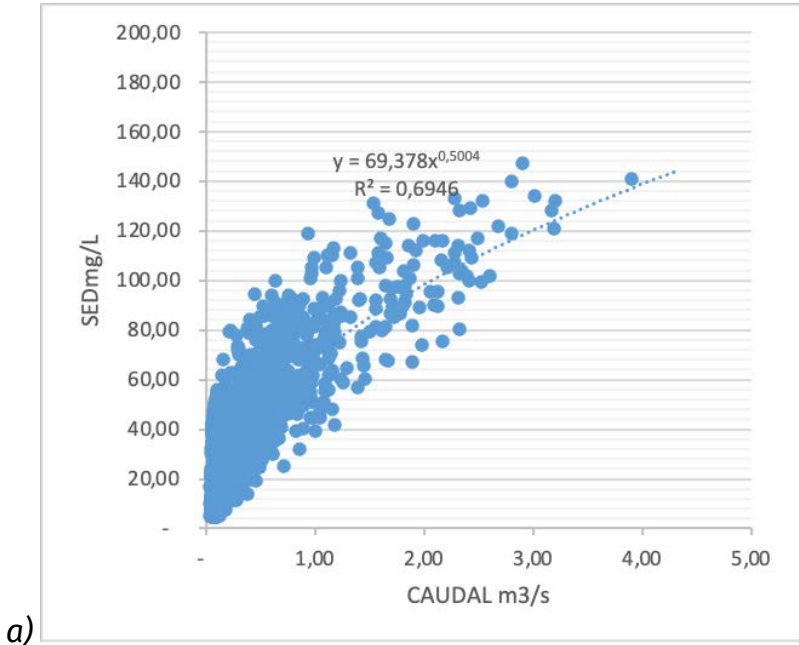
Posteriormente, en el procedimiento de calibración, realizado en el programa SWAT CUP y acorde a parámetros de respuesta superficial, subsuperficial y de respuesta hídrica de la cuenca (XUESONG, 2008), se presenta un valor $R^2=0.7974$ bajo tendencia potencial y menor dispersión, a diferencia del periodo modelados entre 2003 y 2007 sin relación de coeficientes de desempeño ni estimaciones de sensibilidad.

Gráfica 9. Relación, caudales y sedimentos sin calibración

Nota. Relación caudal y sedimentos periodo de calibración 26/07/2003 – 24/07/2007.

Consecutivamente, y con el fin de comparar la relación entre caudales y sedimentos, entre el 25 de julio de 2007 y el 23 de abril de 2011, bajo escala potencial, se obtienen resultados de 0.69 sin determinación de coeficientes y, 0.78 para el caso de validación del modelo hidrológico, siendo superior para todos los casos en los que se ejecutaba ajuste de parámetros dentro de límites realizables; esta particularidad, sigue condiciones en las que el arrastre de sedimentos superficiales y de arrastre se incrementa acorde a los valores obtenidos de flujo, los cuales se encuentran aportados por las unidades de respuesta hidrológica.

Gráfica 10. Relación, caudales y sedimentos sin calibración sin validación y con validación



Nota. Relación caudales y sedimentos periodo 25/07/2007 – 23/04/2011: a) Sin validación, b) Con validación.

4.4 Consideraciones y conclusiones

En cuanto a los algoritmos de calibración:

El modelo hidrológico SWAT, brinda cerca de cinco algoritmos, los cuales son útiles para desarrollar los procesos de calibración, validación, análisis de incertidumbre y análisis de sensibilidad; sin embargo, el algoritmo SUFI-2 fue el más aplicado y recomendado por la literatura revisada. Lo anterior, debido principalmente, a los resultados satisfactorios que permiten alcanzar la modelación en un tiempo corto. El modelo hidrológico TETIS, requiere de la vinculación del SCE-UA, para que el proceso de calibración implementado en algunos algoritmos de SWAT, favorezca el rendimiento del proceso de calibración. El SCE-UA, es ampliamente implementado porque logra combinar los modelos hidrológicos de libre acceso. En cuanto a TETIS, el proceso de calibración arroja un grupo de nueve parámetros de sensibilidad, entre tanto SWAT, no tiene un número fijo de variables sensibles; haciendo amplias las posibilidades de su calibración.

Teniendo en cuenta los datos de entrada:

Otro aspecto de gran relevancia en el momento de calibrar y validar un modelo hidrológico, es el número de variables que este considera para generar la simulación. Tanto SWAT como TETIS, solicitan al usuario información de la zona de estudio similar, salvo por la información geológica que solicita TETIS. Esto, permite concluir que, en cuanto a datos de entrada, ambos modelos tendrían un nivel de incertidumbre semejante.

Según la resolución espacial del modelo:

El proceso de calibración es más exhaustivo y complejo, en la medida en la que hay más detalle en el estudio. En el caso de SWAT, es posible ejecutar un proceso de calibración manual, debido a que su resolución espacial llega hasta HRU. Adicional a esto, la identificación de las variables de sensibilidad, pueden seleccionarse a partir de una excelente revisión bibliográfica. De

esta manera, no solo es posible calibrar el modelo SWAT, sino que también, esta metodología arroja resultados satisfactorios que, en algunos casos resultan ser más precisos que la calibración manual. Por otra parte, el modelo TETIS, requiere de una calibración automática, ya que su nivel de resolución espacial es tipo celda; al tener este nivel de detalle, sería más complejo e impreciso llevar a cabo un procedimiento manual en su calibración, este aspecto tiene influencia en el tiempo de calibración, ya que en TETIS puede superar el tiempo que en la interfaz SWAT.

En cuanto a la producción de sedimentos:

El arrastre de sedimentos superficiales aumenta de acuerdo a los valores obtenidos de flujo, los cuales se encuentran aportados por las 168 unidades de respuesta hidrológica; adicionalmente, y con el fin de establecer la producción de sedimentos, se hace necesaria la calibración y validación del modelo hidrológico semidistribuido SWAT; estas herramientas generan conocimiento para la planificación y toma de decisiones a nivel de cuencas hidrográficas en el desarrollo de la región, considerando que aplicado a estudios de análisis de fertilidad, se recomienda implementar el modelo calibrado y validado para la comparación de fósforo orgánico y mineral con el transporte de sedimentos y caudales para series multianuales.

