

**ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN HÍDRICA PARA LA CUENCA DEL RÍO TONA MEDIANTE
EL MODELO HIDROLÓGICO SEMIDISTRIBUIDO SWAT.**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL.**

AUTOR:

GUSTAVO ADOLFO CARRILLO PEÑA

**ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA**

JULIO DE 2018.

**ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN HÍDRICA PARA LA CUENCA DEL RÍO TONA MEDIANTE
EL MODELO HIDROLÓGICO SEMIDISTRIBUIDO SWAT.**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL.**

**AUTOR:
GUSTAVO ADOLFO CARRILLO PEÑA**

**DIRECTORA:
Ph.D. SANDRA ROCÍO VILLAMIZAR AMAYA**

**ESCUELA DE INGENIERÍAS
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
SECCIONAL BUCARAMANGA
JULIO DE 2018.**

DEDICATORIA.

Se lo dedico primeramente a DIOS fuente de la sabiduría y principio de todo.

***A mi familia, por siempre creer en mí y apoyarme
en todos los momentos para la culminación de esta
importante carrera.***

AGRADECIMIENTOS.

A **Dios** por brindarme sabiduría y un nuevo conocimiento en la oportunidad de estudiar esta carrera tan importante y poder finalizar este trabajo de grado en una gran área de la ingeniería.

A mi familia especialmente, por brindarme todo el apoyo incondicional a cada momento a lo largo de todo este tiempo dándome la mano en aquellos instantes en que más lo necesité.

A mi directora de proyecto la profesora Sandra que, con su apoyo y asesoramiento constante en cada una de las fases de este estudio, me permitió avanzar hasta su finalización y vivir una nueva experiencia en la línea de investigación.

A todos aquellos profesores de quien tuve el gusto de poder aprenderles de su conocimiento.

A mis compañeros con quienes compartí clases a lo largo de estos 5 años.

Al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga y a la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga por proveer la información necesaria para el desarrollo del presente estudio.

TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	OBJETIVOS	2
2.1.	Objetivo general	2
2.2.	Objetivo específico.....	2
3.	MARCO CONCEPTUAL.....	3
3.1.	Cuenca hidrográfica	3
3.2.	Ciclo hidrológico de la cuenca.....	3
3.3.	Balance hídrico en una cuenca hidrográfica	4
3.4.	Modelación hidrológica	5
3.5.	Aplicación de sistemas de información geográfica (SIG) para la gestión de recursos hídricos.....	6
3.6.	Descripción del modelo SWAT.....	7
3.7.	Calibración y validación del modelo	13
4.	DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO	15
4.1.	Características generales de la cuenca	15
4.2.	Hidrografía de la cuenca	17
4.3.	Uso y cobertura de la tierra en la cuenca del Tona.....	17
4.4.	Suelos	18
4.5.	Climatología	19
5.	METODOLOGÍA.....	20
5.1.	Etapas I: Información de entrada al modelo correspondiente a la zona de estudio	20
5.1.1.	GRID—Modelo Digital de Elevación (dem)	21
5.1.2.	GRID—Cobertura y Uso de la tierra (lulc).....	21
5.1.3.	GRID—Suelos (soil).....	23
5.1.4.	Datos de precipitación.....	24
5.1.5.	Datos de temperatura	25
5.1.6.	Información hidrométrica.....	25
5.2.	Etapas II: Ingreso de información a la interface ArcSWAT y primera corrida del modelo	28
5.2.1.	Delineación de la cuenca	29
5.2.2.	Definición de las unidades de respuesta hidrológica (HRU)	31
5.2.3.	Datos climatológicos	35
5.2.4.	Creación de tablas.....	36
5.2.5.	Edición de tablas de entrada.....	36

5.2.6.	Primera corrida del modelo	39
5.2.6.1.	Tablas de salida del modelo.....	40
5.2.6.2.	SWAT Check.....	41
5.2.7.	Modelo conceptual de entradas y salidas de SWAT	41
5.3.	Etapa III: Calibración y validación del modelo.....	42
5.4.	Etapa IV: Corrida del modelo para escenarios modificados.....	44
5.4.1.	Escenarios de uso y cobertura del suelo.....	44
5.4.2.	Escenarios de clima	44
5.5.	Etapa V: Análisis de resultados.....	46
6.	RESULTADOS DE LA MODELACIÓN USANDO DATOS CLIMATOLÓGICOS OBSERVADOS	47
6.1.	Resultados de la primera corrida del modelo.....	47
6.1.1.	Cálculo de relaciones entre elementos del balance hídrico.	48
6.1.2.	Cálculo de la producción hídrica	49
6.1.3.	Comparación entre caudales observados y simulados para la estación Puente Tona.....	49
6.2.	Calibración automática usando SWAT-CUP	50
6.3.	Calibración manual usando la interface de ArcSWAT.....	52
7.	MODELACIÓN DE LA PRODUCCIÓN HÍDRICA DE LA CUENCA PARA ESCENARIOS FUTUROS.	57
7.1.	Resultados globales de la modelación para los escenarios 1, 3, y 5 (RCP 4.5).	57
7.2.	Resultados globales de la modelación para los escenarios 2, 4, y 6 (RCP 8.5).	60
7.3.	Resultados regionales (por subcuencas) de la modelación de la producción hídrica.	62
7.4.	Resultados regionales (por subcuencas) de la modelación de caudales.	65
8.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	68
9.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	70
10.	BIBLIOGRAFÍA.....	72
11.	ANEXOS.....	75

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Características de modelos hidrológicos	5
Tabla 2. Metodos para cálculo de PET.....	10
Tabla 3. Valores de rangos para los indicadores de eficiencia NSE y PBIAS.	14
Tabla 4. Uso y cobertura de la tierra en la cuenca del Tona.....	18
Tabla 5. Archivos de entrada para la modelación hidrológica en SWAT (requerimientos mínimos).	20
Tabla 6. Equivalencias entre usos y coberturas de la cuenca del Tona y la base de datos SWAT	22
Tabla 7. Localización geográfica y elevación de las estaciones con datos de precipitación.....	24
Tabla 8. Ejemplo de datos para las tablas de precipitación observada en cinco estaciones.	25
Tabla 9. Localización geográfica y elevación de las estaciones con datos de temperatura.	25
Tabla 10. Ejemplo de datos para las tablas de temperatura observada en dos estaciones.	25
Tabla 11. Localización de las estaciones de monitoreo de caudal en la cuenca del Tona.	26
Tabla 12. Parámetros morfométricos de las subcuencas del Tona.	30
Tabla 13. Dimensiones de los canales principales.	31
Tabla 14. Áreas por uso de tierras.....	34
Tabla 15. Áreas por tipo de suelo.	34
Tabla 16. Áreas por tipo de pendiente.	34
Tabla 17. Bandas de elevación.....	35
Tabla 18. Parámetros relacionados con el flujo base.	38
Tabla 19. Datos de simulación.....	39
Tabla 20. Parámetros iniciales para la calibración del modelo hidrológico en SWAT.....	42
Tabla 21. Cambios de uso del suelo – Escenario B.	44
Tabla 22. Cambios de uso del suelo – Escenario C.	44
Tabla 23. Coordenadas geográficas de puntos con datos escalados de clima futuro.	45
Tabla 24. Datos para la simulación de condiciones futuras.....	46
Tabla 25. Escenarios modelados para condiciones futuras.....	46
Tabla 26. Valores finales para el proceso de calibración manual en ArcSWAT.	53
Tabla 27. Valores anuales del balance hídrico de la cuenca, escenarios 1 y 3, RCP 4.5.	58
Tabla 28. Valores anuales del balance hídrico de la cuenca, escenarios 1 y 5, RCP 4.5.	59
Tabla 29. Valores anuales del balance hídrico de la cuenca, escenarios 2 y 4, RCP 8.5.	60
Tabla 30. Valores anuales del balance hídrico de la cuenca, escenarios 2 y 6, RCP 8.5.	61
Tabla 31. Resultados de la producción hídrica promedio anual a nivel de subcuencas, escenarios 1 al 6.	62
Tabla 32. Caudales de salida promedio anual a nivel de subcuencas escenarios 1 al 6.	65
Tabla 33. Resultado de indicadores estadísticos.	68
Tabla 34. Unidades de respuesta hidrológica	78
Tabla 35. Unidades de respuesta hidrológica	79
Tabla 36. Áreas de uso de suelos del Mapa 5.....	80
Tabla 37. Áreas de uso de suelos escenario 1 y 2.	80
Tabla 38. Áreas de uso de suelos escenario 3 y 4 – uso 100%.	80
Tabla 39. Áreas de uso de suelos escenario 3 y 4 – uso 50%.	81
Tabla 40. Áreas de uso de suelos escenario 5 y 6 – uso 100%.	81
Tabla 41. Áreas de uso de suelos escenario 5 y 6 – uso 50%.	81

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo hidrológico.....	3
Figura 2. Ilustración esquemática del modelo conceptual de balance hídrico en SWAT.	5
Figura 3. Representación del ciclo hidrológico en el modelo SWAT.	9
Figura 4. Curvas isoyetas cuenca del Tona.	19
Figura 5. Curvas isotermas cuenca del Tona.....	19
Figura 6. Menús principales de la interface de ArcSWAT.	28
Figura 7. Ventana de delineación de la cuenca watershed Delineation.	29
Figura 8. Subcuencas delimitadas por ArcSWAT para la cuenca del Tona.	30
Figura 9. Ventana Land Use data – Soils Data – Slope con sus tres submenús.	32
Figura 10. Definición de unidades de respuesta hidrológica HRU.	33
Figura 11. Ventanas para el ingreso de datos climatológicos.	35
Figura 12. Creación de tablas.....	36
Figura 13. Edición parámetros .BSN.....	37
Figura 14. Ventana de edición de parámetros de aguas subterráneas (.gw).	38
Figura 15. Edición de parámetros para las subcuencas.	39
Figura 16. Configuración de la corrida del modelo para período de calibración.....	40
Figura 17. Tabla de salida del modelo.	40
Figura 18. Proceso general del modelo SWAT: parámetros de entrada y salida.	41
Figura 19. Resumen de la configuración de la modelación en SWAT Check.	47
Figura 20. Ventana SWAT Check - Hidrology.....	47
Figura 21. Resultados de la calibración automática usando SWAT-CUP.	51
Figura 22. Rangos aplicados para los parámetros usados en la calibración automática en SWAT-CUP – iteración final.	51
Figura 23. Parámetros más sensibles en la calibración automática con SWAT-CUP.	52
Figura 24. Ventana para calibración manual en ArcSwat.	52
Figura 25. Ventana para la configuración de cambios de uso del suelo en Arcswat.....	57
Figura 26. Producción hídrica por subcuencas, escenarios 1, 3 y 5.	63
Figura 27. Producción hídrica por subcuencas, escenarios 2, 4 y 6.	64
Figura 28. Caudales de salida por subcuencas, escenarios 1, 3, y 5.	66
Figura 29. Caudales de salida por subcuenca, escenarios 2, 4 y 6.	67

LISTA DE MAPAS

<i>Mapa 1. Localización geográfica de la cuenca del río Tona.</i>	<i>15</i>
<i>Mapa 2. Modelo topográfico de la cuenca del río Tona.</i>	<i>16</i>
<i>Mapa 3. Red de drenaje cuenca del río Tona.</i>	<i>17</i>
<i>Mapa 4. Modelo digital de elevación (DEM) de la cuenca del río Tona.</i>	<i>21</i>
<i>Mapa 5. Mapa de uso y cobertura de la tierra junto con su tabla “look up” correspondiente.</i>	<i>23</i>
<i>Mapa 6. Mapa de suelos junto con su tabla “look up” correspondiente.</i>	<i>24</i>
<i>Mapa 7. Localización geográfica de estaciones de monitoreo de información hidrométrica y climatológica de la cuenca del río Tona.</i>	<i>28</i>
<i>Mapa 8. Mapa de pendientes agrupadas por clases.....</i>	<i>32</i>
<i>Mapa 9. Mapa de localización de los puntos con datos escalados de clima futuro.....</i>	<i>45</i>
<i>Mapa 10. Mapa de distribución de los caudales de salida simulados por el modelo (promedios anuales).</i>	<i>55</i>
<i>Mapa 11. Mapa de producción hídrica por HRU’s.</i>	<i>56</i>

LISTA DE GRÁFICAS

<i>Gráfica 1. Caudales promedios mensuales para la estación Puente Tona.</i>	<i>27</i>
<i>Gráfica 2. Caudales simulados vs. observados en la estación Puente Tona para la primera corrida del modelo.</i>	<i>49</i>
<i>Gráfica 3. Caudales simulados vs. caudales observados para la calibración manual de la cuenca del Tona.</i>	<i>54</i>
<i>Gráfica 4. Validación del modelo calibrado para el período 1989-2002.</i>	<i>55</i>
<i>Gráfica 5. Caudales simulados RCP 4.5, escenarios 1 y 3.</i>	<i>58</i>
<i>Gráfica 6. Caudales simulados RCP 4.5, escenarios 1 y 5.</i>	<i>59</i>
<i>Gráfica 7. Caudales simulados RCP 8.5, escenarios 2 y 4.</i>	<i>60</i>
<i>Gráfica 8. Caudales simulados RCP 8.5, escenarios 2 y 6.</i>	<i>61</i>

RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

TITULO: ESTIMACIÓN DE LA PRODUCCIÓN HÍDRICA PARA LA CUENCA DEL RÍO TONA MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SEMIDISTRIBUIDO SWAT.

AUTOR(ES): Gustavo Adolfo Carrillo Peña

PROGRAMA: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR(A): Sandra Rocío Villamizar Amaya

RESUMEN

La modelación hidrológica puede ser usada para comprender los procesos más determinantes en la producción hídrica de una cuenca y de esta manera enfocar las actividades de manejo de esta. Este estudio utilizó el modelo hidrológico semidistribuido SWAT para determinar la producción hídrica de una cuenca ante diferentes escenarios de uso de suelo y climatológicos. La cuenca de estudio es la del río Tona (Santander, Colombia) que es la fuente principal de abastecimiento para el área metropolitana de Bucaramanga. El estudio conllevó esfuerzos importantes en (1) conocer la estructura y funcionamiento de la herramienta de modelación, (2) obtener, analizar y preparar los datos necesarios para correr el modelo, (3) definir la mejor estrategia de calibración y validación, (4) correr del modelo para diferentes escenarios de clima y cambios en el uso del suelo. Los resultados obtenidos permitieron comparar la producción hídrica para condiciones actuales (período 1987-2002) con condiciones futuras (2006-2050) de uso del suelo y climatología (modelo climatológico escalado MIROC5, escenarios RCP 4.5 Y 8.5). La modelación de escenarios futuros permitió obtener valores globales de producción hídrica para la cuenca (promedios anuales de producción hídrica) y determinar, a nivel de subcuenca, las áreas estratégicas donde se pueden enfocar las actividades de conservación y protección por parte de los manejadores del recurso hídrico.

PALABRAS CLAVE:

Modelación hidrológica, SWAT, escenarios, producción hídrica.

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE

TITLE: WATER YIELD ESTIMATION FOR THE TONA WATERSHED USING THE SEMIDISTRIBUTED HYDROLOGICAL SWAT MODEL.

AUTHOR(S): Gustavo Adolfo Carrillo Peña

FACULTY: Facultad de Ingeniería Civil

DIRECTOR: Sandra Rocío Villamizar Amaya

ABSTRACT

Hydrologic modelling can be used to understand the most determinant processes related to water yield within a watershed and hence better focus the management efforts put on it. This study used the semidistributed hydrological model SWAT to evaluate a watershed's water yield in the context of different land use and climate scenarios. The watershed of interest for this study is Tona (located in Santander, Colombia), the most important source of water for the metropolitan area of Bucaramanga. This study implied important efforts in (1) getting to know the structure and working of the modelling tool, (2) obtaining, analyzing, and preparing all the data necessary to run the model, (3) defining the best strategy for model's calibration and validation, (4) running the model for the different land use and climate scenarios. The results of the study allowed to compare water yield estimates for current conditions (1987-2002 period) with those of future ones (2006-2050 period) for land use and climate (future scenarios were obtained from the downscaled climate model MIROC5, RCP 4.5 and 8.5). The modelling effort for future scenarios produced global estimates of the basin's water yield (average annual values) and, at the subbasin level, allowed to identify strategic areas where the protection and conservation activities of the basin's water managers can be focused.

KEYWORDS:

hydrologic modelling, SWAT, scenarios, water yield

V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un elemento fundamental para el desarrollo del planeta y el estado de este recurso afecta a todos los sistemas naturales, sociales y económicos, ya que este es el vínculo fundamental entre el sistema climático, la sociedad humana y el medio ambiente. Los fuertes cambios climáticos están perjudicando gravemente el ciclo hidrológico y, en consecuencia, la gestión del agua que se refleja en los efectos significativos del desarrollo humano y la seguridad [1]. Estos cambios climáticos se ven originados por las concentraciones de los gases de efecto invernadero y aerosoles en la atmósfera, por la cubierta terrestre y la radiación solar que altera el balance de energía del sistema climático [2].

El crecimiento de la demanda del recurso de agua generado por el aumento excesivo de la población va acompañado de un aumento en la contaminación del mismo recurso [3], causando problemas en el desarrollo económico y social para muchas regiones incluyendo las que se encuentran localizadas en zonas áridas. Este tipo de situaciones se ven originadas por la deficiente gestión del recurso y el desconocimiento de estos [4]. Actualmente el panorama global es complicado y desigual, con diferentes regiones, cuencas fluviales y localidades afectadas en diferentes grados y en una variedad de formas [1].

La gestión sostenible y el desarrollo de los recursos hídricos desempeñarán un papel fundamental en la preparación de las sociedades para adaptarse al cambio climático con el fin de aumentar la resiliencia y alcanzar los objetivos de desarrollo; esto requiere cambios de políticas y gobernanza, inversiones y cambios en la forma en que se abordan las cuestiones del agua en estrategias de desarrollo y presupuestos [1].

Hoy en día existe un notable incremento en la tendencia de los estudios que evalúan, en los ámbitos regional o local, el impacto potencial del cambio climático en la disponibilidad de los recursos hídricos. Se están usando diferentes enfoques para lograr este objetivo, entre los que se incluye el uso de modelos climáticos, hidrológicos y técnicas de regionalización [3].

Este estudio se desarrolló en la cuenca del río Tona localizada en el Departamento de Santander. Esta cuenca es de alta importancia para el área metropolitana de Bucaramanga ya que es una zona que proporciona 1400 lps al acueducto metropolitano de Bucaramanga (amb) mediante tres captaciones (Armania, Carrizal y Golondrinas) localizadas en la parte media de la cuenca. Hace aproximadamente 3 años se finalizó la construcción del Embalse de Bucaramanga, localizado en la parte baja de la cuenca y diseñado para albergar un volumen total de 17.60 millones de m³, y regular un caudal adicional de 1200 lps al sistema actual [5].

El estudio se llevó a cabo por medio de la modelación hidrológica empleando herramientas computacionales pertinentes como ArcGIS y el modelo hidrológico semidistribuido SWAT, permitiendo obtener estimativos de producción hídrica y caudales para condiciones de uso del suelo y clima presentes y futuros. Los resultados de este ejercicio de modelación pueden servir a los actores involucrados en el manejo y gestión de la cuenca hidrográfica para la toma de decisiones que propendan por el beneficio de todos los usuarios de los servicios ecosistémicos de la cuenca.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Evaluar la producción hídrica en la cuenca del río Tona (Santander) ante condiciones presentes y futuras de uso del suelo y escenarios de cambio climático, usando el modelo hidrológico semidistribuido SWAT.

2.2. Objetivo específico

- Determinar la información básica para usar en el proceso de modelación a partir de una revisión bibliográfica profunda que incluya estudios técnicos realizados en el área de estudio, y científicos que contribuyan a fortalecer el producto académico desarrollado.
- Calibrar el modelo hidrológico mediante el ajuste de parámetros que permitan simular los caudales observados en la cuenca para el período de evaluación.
- Modelar escenarios futuros de producción hídrica con base en los escenarios propuestos dentro del plan de ordenamiento ambiental territorial de la cuenca (para uso del suelo) y los propuestos en el marco de los estudios de cambio climático realizados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC).
- Analizar los resultados del comportamiento de la cuenca frente a cada simulación ejecutada para generar conclusiones y recomendaciones que puedan servir como herramienta de toma de decisiones para los entes administradores del recurso hídrico en la cuenca.

3. MARCO CONCEPTUAL

En esta sección se presentan conceptos fundamentales para la comprensión del producto presentado. La primera subsección trata sobre el concepto de cuenca hidrográfica y su importancia en el contexto de la producción hídrica. La segunda subsección describe el ciclo hidrológico de la cuenca y sus elementos. La tercera subsección presenta la estrategia para el cálculo del balance hídrico de una cuenca. La cuarta subsección habla sobre la modelación hidrológica y su potencialidad en la estimación de la producción hídrica. La quinta subsección muestra cómo las aplicaciones SIG pueden fortalecer la modelación hidrológica. La sexta subsección describe los principios fundamentales del modelo hidrológico semidistribuido SWAT, que fue usado en el desarrollo de este trabajo de grado. Finalmente, la séptima subsección cierra con información sobre los procesos de calibración y validación de los modelos hidrológicos.

3.1. Cuenca hidrográfica

La cuenca hidrográfica se define como una región geográfica o unidad de paisaje natural que contribuye el agua que pasa por la sección transversal de un drenaje en el punto que se considera como punto de salida de la misma. Este concepto es fundamental porque se asume usualmente que la mayoría del agua que pasa por la sección transversal del punto de salida de la cuenca, se origina como precipitación sobre el área superficial de la cuenca (área de drenaje), y son las características de la cuenca (geología, suelos, topografía, y uso y cobertura del suelo), las que determinan las rutas y las tasas de movimiento del agua ya sea a través de la red superficial de drenajes o a través del subsuelo [6]. Desde el aspecto de la producción hídrica, es importante reconocer que los distintos ecosistemas terrestres y acuáticos que existan dentro de la cuenca, así como también sus características topográficas, influyen en los procesos hidrometeorológicos que ocurren en la misma. De la misma manera, el ser humano con sus acciones de protección o afectación (actividades antrópicas) definen en gran manera, no solo la cantidad sino la calidad del recurso hídrico producido por esta.

3.2. Ciclo hidrológico de la cuenca

Representa el conjunto de procesos asociados a la circulación del agua (en todas sus fases) desde el reservorio atmosférico a los distintos componentes del reservorio terrestre y, de nuevo, al atmosférico [7] (ver *Figura 1*). Los procesos del ciclo hidrológico son:



Figura 1. Ciclo hidrológico.

Fuente: <https://water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html>.

- **Evapotranspiración**

Proceso físico que permite el transporte de agua a la atmósfera en estado gaseoso. La evapotranspiración consiste en dos procesos simultáneos. Primero, evaporación, que consiste en el cambio de fase de estado sólido o líquido a gaseoso, para el agua que se encuentra en el suelo, en la cubierta vegetal o en cuerpos de agua. Segundo, transpiración, que consiste en el transporte de agua por parte de las plantas desde sus raíces hasta los estomas de las hojas, en un proceso asociado al transporte de los minerales y nutrientes requeridos para su crecimiento [8]. El concepto de evapotranspiración potencial (PET) es un elemento importante dentro del balance hídrico de una cuenca pues estima la máxima pérdida posible de agua por estos dos procesos, para unas condiciones definidas. Este concepto fue originalmente introducido por Thornthwaite (1948) como parte de un esquema de clasificación del clima [9].

- **Precipitación**

La precipitación ocurre cuando se condensa el vapor de agua produciendo su caída sobre la superficie terrestre en forma de nieve, granizo, rocío o lluvia [10]. Para lograr este proceso de condensación es necesario que se produzca la saturación como condición esencial mediante procesos termodinámicos [7]. La precipitación es la fuente principal de agua en la superficie terrestre desde el punto de vista hidrológico [11].

- **Percolación**

Flujo de líquido a través de un medio poroso, por ejemplo de agua en el suelo, bajo la acción de gradientes hidráulicos moderados; principalmente es un flujo debido a la gravedad. [12].

- **Infiltración**

Proceso por el cual el agua penetra en el suelo, a través de la superficie de la tierra, y queda retenida por ella o alcanza un nivel acuífero incrementando el volumen acumulado anteriormente. Superada por la capacidad de campo del suelo, el agua desciende por la acción conjunta de las fuerzas capilares y de la gravedad. Esta parte del proceso recibe distintas denominaciones: percolación, infiltración eficaz, infiltración profunda, etc [13].

- **Escorrentía / Esguerrimiento**

De acuerdo con el ciclo hidrológico, el esguerrimiento se puede definir como la porción de la precipitación que ocurre en una zona o cuenca hidrológica y que circula sobre o debajo de la superficie terrestre y que llega a una corriente para ser drenada hasta la salida de una cuenca o bien alimentar un lago, si se trata de cuencas abiertas o cerradas, respectivamente [14].

3.3. Balance hídrico en una cuenca hidrográfica

El balance o equilibrio hídrico usa el principio de conservación de masas o de continuidad para evaluar el flujo de agua dentro de una cuenca hidrográfica. Para un período de tiempo determinado, el cambio en el volumen de almacenamiento de la cuenca se calcula como la diferencia entre los flujos de entrada y los de salida [15], por lo tanto en la *Figura 2* se presenta esquemáticamente los procesos que conforman cada uno de los componentes del balance hídrico:

$$\text{Flujo de entrada} - \text{Flujo de salida} = \Delta \text{Volumen de almacenamiento}$$

Dentro de los flujos de entrada se considera la precipitación y en algunas ocasiones el flujo de agua subterránea a la cuenca, y dentro de los flujos de salida se consideran la evapotranspiración, el flujo de agua subterránea que se infiltra a los acuíferos profundos o que fluye hacia otras cuencas, y la salida de caudal en el punto de cierre de la cuenca hidrográfica. La cuantificación de los términos del balance hídrico es normalmente complicada, principalmente por la falta de mediciones directas en campo, por la variación espacial de dichos términos, por el desconocimiento de las pérdidas a acuíferos profundos, y por el desconocimiento de las variaciones del agua

almacenada en la cuenca. Como respuesta a estas dificultades, generalmente se admiten dos consideraciones: (1) Las pérdidas al acuífero profundo son despreciables (se considera, por tanto, que la cuenca es impermeable), (2) Admite que las variaciones del agua almacenada en la cuenca son despreciables para un período suficientemente largo (normalmente un año, condiciones estacionarias) [16].

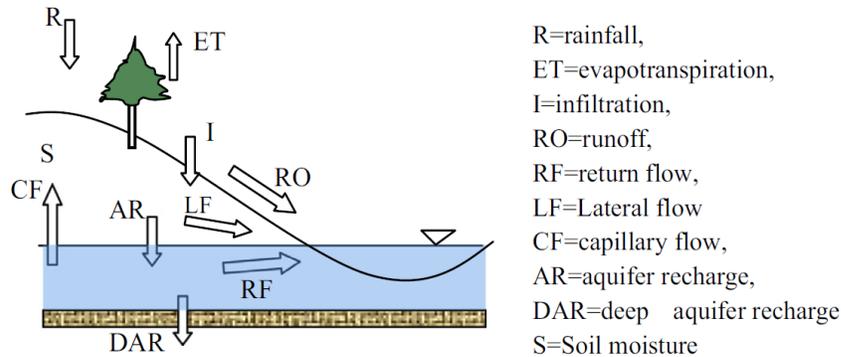


Figura 2. Ilustración esquemática del modelo conceptual de balance hídrico en SWAT.

Fuente: A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model,

3.4. Modelación hidrológica

Un modelo se define como la representación de una parte de un sistema que conceptualiza las interrelaciones y respuestas de las condiciones reales, y que es capaz de hacer pronósticos bajo un conjunto de condiciones propuestas. En el ámbito de la modelación hidrológica, los modelos son representaciones de los fenómenos hidrológicos que se presentan en el ciclo del agua, éstos son aproximaciones de la realidad y en consecuencia, la salida de un sistema real puede predeterminarse con cierto grado de confianza [17]. De acuerdo con Sorooshian et al. (2008), un modelo es una representación simplificada del sistema del mundo real. El mejor modelo es el que da resultados cercanos a la realidad con el uso de los parámetros mínimos y la complejidad del modelo. Los modelos se utilizan principalmente para predecir el comportamiento del sistema y comprender diversos procesos hidrológicos [18].

Tipos de modelos: La Tabla 1 presenta una clasificación de los diferentes tipos de modelos hidrológicos

Modelo Empírico	Modelo Conceptual	Modelo Basado en la física
Modelo basado en datos o métrico o caja negra.	Modelo paramétrico o caja gris.	Mecanismo o modelo de caja blanca.
Involucra ecuaciones matemáticas, deriva valores de series de tiempo disponibles.	Basado en el modelado de reservorios e Incluye ecuaciones semi empíricas con base física.	Basado en la distribución espacial, Evaluación de los parámetros que describen la física características.
Poca consideración de las características y procesos del sistema.	Los parámetros se derivan de datos de campo y calibración.	Requerir datos sobre el estado inicial del modelo y morfología de la cuenca.
Alto poder predictivo, baja profundidad explicativa.	Simple y se puede implementar fácilmente en código de computadora.	Modelo complejo. Requerir experiencia humana y capacidad de cálculo.
No se puede generar a otras cuencas.	Requiera gran hidrología y datos meteorológicos.	Experimentar problemas relacionados con la escala.
ANN, hidrograma unitario.	Modelo HBV, TOPMODEL.	Modelo SHE o MIKESHE, SWAT.
Válido dentro del límite de dominio.	La calibración involucra el ajuste de curvas de difícil interpretación física.	Válido para una amplia gama de situaciones.

Tabla 1. Características de modelos hidrológicos

Fuente: Devi y otros [18]

Clasificación de los modelos hidrológicos

Modelos determinísticos: son formulados siguiendo fórmulas de la física y/o procesos químicos descriptos por ecuaciones diferenciales. Un modelo determinístico es formulado en términos de un grupo de variables y parámetros y ecuaciones relacionadas a ellos. Un modelo determinístico implica una relación causa-efecto entre los valores de los parámetros elegidos y los resultados obtenidos de la aplicación de las ecuaciones. Idealmente, un modelo determinístico debería proveer el mejor detalle en la simulación de los procesos físicos o químicos. En la práctica, sin embargo, la aplicación de modelos determinísticos está asociada frecuentemente a la incapacidad del modelo o del modelador de resolver la variabilidad temporal y espacial del fenómeno natural en incrementos suficientemente pequeños [19].

Modelos probabilísticos: son exactamente lo opuesto en significado a los modelos determinísticos. Un modelo probabilístico se formula siguiendo las leyes del azar o probabilidad. Los modelos probabilísticos son de dos tipos: (1) estadísticos, y (2) estocásticos. Los modelos estadísticos tratan con ejemplos observados, mientras que los modelos estocásticos con la estructura del azar observada en ciertas series hidrológicas temporales - por ejemplo, flujos diarios de corriente en cuencas de tamaño medio. El desarrollo de modelos estadísticos requiere invariablemente el uso de datos; los modelos estocásticos enfatizan sobre las características estocásticas de los procesos hidrológicos [19].

Modelos conceptuales: son representaciones simplificadas de los procesos físicos, usualmente recaen sobre descripciones matemáticas (ya sean en forma algebraica o por ecuaciones diferenciales ordinarias), que simulan procesos complejos basándose en unas pocas claves de parámetros conceptuales. El uso extensivo de los modelos conceptuales en la ingeniería hidrológica refleja la complejidad inherente del fenómeno y la incapacidad práctica de considerar los componentes determinísticos en todas las instancias. De allí que los modelos conceptuales son sustitutos útiles y prácticos para los modelos determinísticos [19].

Modelos paramétricos: (esto es: empírico, o caja negra) son los más simples de todas las propuestas de modelado. Como su nombre indica, el énfasis de los modelos paramétricos está en los parámetros empíricos en los que está basada la solución. Usualmente, un modelo paramétrico consiste en una ecuación (o ecuaciones) algebraica que contiene uno o más parámetros a ser determinados por el análisis de datos u otro medio empírico. La aplicabilidad de los modelos paramétricos está restringida al rango de datos utilizados en la determinación de los valores de los parámetros. Los modelos paramétricos son útiles cuando los modelos conceptuales, determinísticos o probabilísticos no son prácticos o son demasiado caros [19].

3.5. Aplicación de sistemas de información geográfica (SIG) para la gestión de recursos hídricos

Los SIG se componen de una base de datos espacialmente referenciada y de un conjunto de instrucciones y procedimientos que permiten operar sobre ella. La evolución de estos sistemas se produjo desde la cartografía tradicional pasando por la aparición de aplicaciones informáticas basadas en el diseño asistido por computador (CAD) funciones que han sido pródigamente adoptadas por la hidrología con la implementación de los SIG para posteriormente avanzar en la visualización de los gráficos digitales en los años 60 y 70 donde se tuvieron importantes progresos en nuevas rutinas de las funciones de análisis espacial [20]. El interés de soportar la gestión de los recursos hídricos con herramientas SIG, ha permitido el desarrollo de modelos hidrológicos que requieren como datos de entrada una amplia gama de datos espaciales como relieve, clima, suelos, y uso y cobertura de la tierra [21]. Como producto fundamental se puede resaltar la evaluación de localización y magnitud de riesgos naturales [20] aplicados a diferentes situaciones como el suministro de agua, calidad de agua y los problemas de gestión de aguas pluviales en varios contextos [21].

Actualmente numerosos modelos de parámetros agrupados (por ejemplo, HEC, MODFLOW, MIKE y SWAT) han incorporado el componente SIG como estrategia para el mejoramiento de la evaluación de los flujos de aguas superficiales y subterráneas [21]. Un ejemplo de esto fue el desarrollo de las interfaces en GRASS y ArcGIS para el modelo SWAT. Estas interfaces proveen una colección de herramientas SIG que soportan las necesidades de preparación, desarrollo y análisis de datos del modelo SWAT [22]. En general, estas herramientas que incorporan la variabilidad espacial de datos de entrada y la topografía del terreno ofrecen la mejor oportunidad para la comprensión de los procesos espaciales y los patrones que afectan a la distribución y el movimiento del agua en los paisajes, así como el impacto del uso de la tierra sobre los recursos hídricos a largo plazo [21].

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se han convertido en herramientas útiles e importantes en hidrología para el estudio científico y la gestión de los recursos hídricos. Dado que el agua está constantemente en movimiento, su ocurrencia varía espacial y temporalmente a lo largo del ciclo hidrológico. Por lo tanto, el estudio del agua utilizando SIG es especialmente práctico [23].

3.6. Descripción del modelo SWAT

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) es un modelo hidrológico semidistribuido de base física, desarrollado en conjunto entre el USDA Agricultural Research Service y la Universidad de Texas A&M AgriLife Research. El modelo fue desarrollado para predecir el impacto de las prácticas de gestión de la tierra en el agua, los sedimentos y los rendimientos químicos agrícolas en grandes cuencas hidrográficas complejas con suelos variables, uso de la tierra y condiciones de manejo durante largos períodos de tiempo [9]. El modelo requiere datos de entrada específicos como series históricas de clima (precipitación y temperatura), propiedades de los suelos, topografía, uso y cobertura vegetal, y prácticas de manejo de la tierra. Todas estas entradas son características propias dentro de una cuenca y son la base para la simulación física del movimiento del agua, transporte de sedimentos, ciclo de nutrientes, etc.

La modelación en SWAT aplica el balance hídrico a nivel de unidad de respuesta hidrológica (HRU) que es la combinación particular de un tipo de pendiente, un tipo de suelo y un tipo de uso y cobertura del suelo dentro de una subcuenca específica de la cuenca a modelar. Sin embargo, la mínima unidad física identificada por SWAT es la subcuenca. La estrategia de modelación es computacionalmente eficiente, basada en procesos, y está diseñada para ejecutar modelación continua, detallada, en cuencas extensas, para períodos de tiempos largos y con la capacidad de simular diferentes acontecimientos [9]. A continuación, se presentan algunos aspectos importantes para la modelación hidrológica con SWAT.

- **Clima**

El clima es una variable importante que influye dentro del balance hídrico modificando algunos componentes del ciclo hidrológico, y con ello afectando directamente la respuesta hídrica de la cuenca para diferentes periodos de tiempo debido a que el clima no es constante. Dentro del modelo SWAT las variables climáticas requeridas para su ejecución son precipitación, temperatura del aire (máxima y mínima), radiación solar, velocidad del viento, y humedad relativa. Para cada una de estas variables el modelo permite ingresar datos reales observados para el tiempo que se desee analizar, pero en dado caso que no se dispongan de estos datos SWAT contiene un generador de clima (WXGEN) para generar datos climáticos o llenar espacios vacíos de los datos observados (a continuación, se detallan las estrategias del generador de clima). Sin embargo, siempre que sea posible, se recomienda el uso de datos observados (al menos para el caso de precipitación y temperatura) ya que esto permitirá reducir la incertidumbre de los resultados de la modelación.

✓ Precipitación

El modelo de precipitación SWAT desarrollado por Nicks (1974) es un modelo de cadena de primer orden, por lo tanto las entradas al modelo deben incluir las probabilidades mensuales de recibir precipitación si el día anterior fue seco o húmedo. Dada la relación húmedo – seco, el modelo determina estocásticamente si ocurre o no precipitación. Cuando un evento de precipitación ocurre, la lámina se calcula a partir de la generación de una distribución de la precipitación diaria. La cantidad de precipitación diaria se reparte entre lluvia y nieve usando la temperatura diaria promedio del aire [17].

✓ Temperatura del aire y radiación solar

La temperatura de aire máxima y mínima, así como la radiación solar, se generan a partir de una distribución normal corregida por las probabilidades húmedo – seco. El factor de corrección se usa para dar mayor desviación a la temperatura y radiación cuando el clima cambia y para días lluviosos. De esta manera las desviaciones son menores en días secos. Los factores de corrección se calculan para asegurar que las desviaciones estándar a lo largo de variables diarias se mantengan [17].

✓ Velocidad del viento y humedad relativa

La velocidad del viento diaria se simula usando una ecuación especial, ya que la velocidad mensual media del viento es un factor de entrada. El modelo de humedad relativa simula promedios diarios a partir de promedios mensuales, esto lo hace utilizando una distribución triangular igual que con la temperatura y la radiación, la humedad relativa media diaria se ajusta para tomar en cuenta los efectos de días húmedos y secos [17].

• **Hidrología**

No importa qué tipo de problema se estudie con SWAT, el balance de agua es la fuerza impulsora detrás de todo lo que sucede en la cuenca [9]. El modelo hidrológico simulado mediante SWAT se basa en la ecuación general de balance de agua:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^T (R_{\text{day}} - Q_{\text{surf}} + E_a - W_{\text{seep}} - Q_{\text{gw}})$$

Donde:

SW_t: contenido final de agua en el suelo (mm H₂O).

SW₀: contenido inicial de agua en el suelo (mm H₂O).

T: intervalo de tiempo para la modelación (día, mes, año).

R_{day}: cantidad de precipitación en el día i (mm H₂O).

Q_{surf}: cantidad de escorrentía superficial en el día i (mm H₂O).

E_a: cantidad de evapotranspiración el día i (mm H₂O).

W_{seep}: cantidad de percolación y derivación flujo que sale del fondo del perfil del suelo en el día i (mm H₂O).

Q_{gw}: cantidad de flujo de retorno en el día i (mm H₂O).

La simulación de la hidrología de una cuenca hidrográfica se puede separar en dos divisiones principales.

- La primera es la fase terrestre del ciclo hidrológico, que se muestra en la *Figura 3*.
- La segunda es la fase de agua o de enrutamiento del ciclo hidrológico que se puede definir como el movimiento de agua, sedimentos, etc., a través de la red de canales al punto de salida de la cuenca [9].

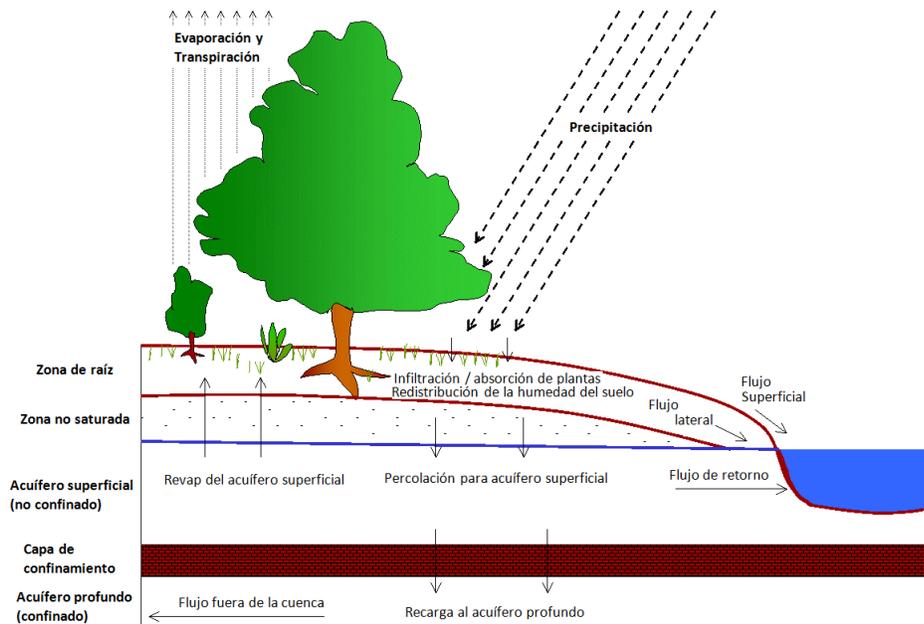


Figura 3. Representación del ciclo hidrológico en el modelo SWAT.
Fuente: Manual SWAT2009 Documento teórico página 8.

De acuerdo con el esquema de la Figura 3, se discuten a continuación algunos aspectos relevantes para el cálculo del balance hídrico.

Precipitación: Se determina a partir de los datos (series históricas) ingresados al modelo, basados en las lecturas tomadas durante un periodo de tiempo, o en su defecto, a partir de los datos generados por el generador de clima.

Escorrentía superficial: el cálculo de la escorrentía superficial se estima a partir de la precipitación y empleando el método del Soil Conesevation Service (SCS) de los Estados Unidos de América (hoy día denominado Natural Resources Conservation Service, NRCS), denominado “número de curva de escorrentía CN”. El método calcula la escorrentía superficial (Q_{surf}) con la ecuación:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} + 0.8S)} \text{ [mm]}$$

Donde:

R_{day} : la precipitación total del día (mm)

S : un parámetro de retención que varía espacialmente debido a los cambios en los suelos, el uso de la tierra, el manejo y la pendiente, y temporalmente, debido a cambios en el contenido de agua del suelo.

El parámetro de retención (S) se calcula con la ecuación:

$$S = 25.40 * \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \text{ [mm]}$$

Donde:

CN: Número de curva de escorrentía superficial (adimensional). El número de curva, CN, oscila en un rango de 1 a 100 (adimensional) [12] que corresponde a:

CN= 1 suelo con alta infiltración

CN=100 suelo con muy baja infiltración (impermeable).

El método asigna un CN a cada grupo hidrológico de suelos y tipos de uso del suelo asumiendo una condición de humedad antecedente tipo II (condiciones de humedad antecedente promedio del suelo). Sin embargo, estos números se deben corregir si la condición es tipo I (condiciones de humedad antecedente secas o punto de marchitamiento) o de tipo III (condiciones de humedad antecedente húmedas o de capacidad de campo. Los números de curva para las condiciones de humedad I y III se calculan con las siguientes ecuaciones [9]:

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20 \cdot (100 - CN_2)}{(100 - CN_2 + \exp[2.533 - 0.0636 \cdot (100 - CN_2)])}$$

$$CN_3 = CN_2 \cdot \exp[0.0636 \cdot (100 - CN_2)]$$

Donde:

CN₁: es la curva numérica de la condición húmeda I.

CN₂: es el número de curva para condiciones antecedentes de humedad del suelo tipo II (promedio).

CN₃: es la curva número de la condición húmeda III.

Evapotranspiración potencial: para calcular la evapotranspiración PET se han desarrollado varios métodos que permitan su estimación. SWAT incorpora tres de estos métodos que pueden ser seleccionados por el usuario de acuerdo a la información que se tenga: el método Penman-Monteith (Monteith, 1965; Allen, 1986; Allen et al., 1989), el método Priestley-Taylor (Priestley y Taylor, 1972) y el método de Hargreaves (Hargreaves et al., 1985). Adicionalmente SWAT permite ingresar datos de valores diarios de PET [9]. Los tres métodos de evapotranspiración incluidos en SWAT varían de acuerdo con las entradas requeridas (ver *Tabla 2*).

Método para estimar PET	Entrada
Penman-Monteith	<ul style="list-style-type: none">• Radiación solar.• Temperatura del aire.• Humedad relativa.• Velocidad del viento.
Priestley-Taylor	<ul style="list-style-type: none">• Energía solar radiación.• Temperatura del aire.• Humedad relativa.
Hargreaves	<ul style="list-style-type: none">• Temperatura del aire.

Tabla 2. Metodos para cálculo de PET.

Fuente: Literatura Swat [9].

Percolación: Se refiere al paso del agua de una capa a otra por filtración, una vez ha sido excedida la capacidad de campo de la capa atravesada. El flujo, por acción de la gravedad, puede atravesar varias capas, saturándolas, hasta llegar a la parte final del perfil del suelo en donde el flujo restante puede convertirse en la recarga de un acuífero [9].

En los suelos el flujo lateral está relacionado con la percolación y es significativo cuando posee altas conductividades hidráulicas, ya que la infiltración del agua como se mencionó anteriormente puede llegar a una

capa impermeable, generando un almacenamiento de agua sobre dicha capa que ocasiona el flujo sub-superficial lateral. SWAT incorpora un modelo cinemático de almacenamiento para el flujo sub-superficial [9].

$$Q_{lat} = 0.024 \cdot \left(\frac{2 \cdot SW_{ly,excess} \cdot K_{sat} \cdot slp}{\phi_d \cdot L_{hill}} \right) \text{ [mm H}_2\text{O/dia]}$$

Donde:

Q_{lat}: agua descargada a la salida de la ladera (mm H₂O/dia).

SW_{lay}: contenido de agua saturada de la capa de suelo en un dado (mm H₂O).

K_{sat}: conductividad hidráulica (mm · h⁻¹).

Ø_d: porosidad drenable de la capa de suelo (mm / mm).

L_{hill}: longitud de la ladera (m).

La porosidad drenable de la capa de suelo se calcula como la diferencia entre la porosidad del suelo y la porosidad para condiciones de capacidad de campo:

$$\phi_d = \phi_{soil} - \phi_{fc}$$

$$\phi_{soil} = 1 - \frac{\rho_b}{\rho_s}$$

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_T}$$

$$V_T = V_A + V_W + V_S$$

Donde:

Ø_{soil}: porosidad del suelo (mm / mm).

Ø_{fc}: porosidad de la capa de suelo llena con agua cuando la capa está en el contenido de agua de la capacidad de campo (mm / mm).

ρ_b: densidad aparente (Mg/m³).

ρ_s: densidad de la partícula (Mg/m³).

M_s: masa de los sólidos (Mg).

V_T: Volumen total (m³).

V_A: Volumen de aire (m³).

V_w: Volumen de agua (m³).

V_s: Volumen de sólidos (m³).

Con base en investigaciones, se utiliza un valor predeterminado de 2.65 Mg/m³ para la densidad de partícula [24].

Agua subterránea flujo base: corresponde al agua que satura a los materiales del suelo bajo una presión mayor a la atmosférica y pasa a zonas de almacenamiento mediante los procesos de percolación e infiltración, o mediante el paso de agua por infiltración de cuerpos de agua superficiales. El agua almacenada puede salir hacia las fuentes superficiales por acción gravitatoria o por capilaridad hacia la superficie [9]. Se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{gw} = \left(\frac{8000 \cdot K_{sat}}{L_{gw}^2} \right) * h_{wtbl} \text{ [mm H}_2\text{O/dia]}$$

Donde:

Q_{gw} : caudal del agua subterránea en el cauce principal al día i .

K_{sat} : conductividad hidráulica del acuífero (mm/día).

L_{gw} : distancia desde la cresta o subcuenca divisoria para el sistema de agua subterránea en el cauce principal (m).

H_{wtb} : altura del nivel freático (m).

La constante de recesión del flujo base se mide mediante dos tipos de factores.

- **Factor alfa de flujo de base (ALPHA_BF)**: La constante de recesión de flujo base, α_{gw} , es un índice directo de respuesta del flujo del agua subterránea a los cambios en la recarga [25]; se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\alpha_{gw} = \frac{1}{BFD} * \ln(10) \cong \alpha_{gw} = \frac{2.3}{BFD}$$

Donde:

α_{gw} : constante de recesión de flujo base.

BFD: número de días de flujo base para la cuenca hidrográfica.

- **Factor alfa (ALPHA_BF_D)**: Factor alfa para la curva de recesión del agua subterránea del acuífero profundo [25].

$$\alpha_{gw} = \frac{1}{BFD}$$

Cuando el acuífero superficial no recibe recarga, se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{gw} = Q_{gw,0} \cdot \exp[-\alpha_{gw} \cdot t]$$

Donde:

$Q_{gw,0}$: es el flujo de agua subterránea en el canal principal al comienzo de la recesión (tiempo $t = 0$) (mm H₂O).

α_{gw} : constante de recesión de flujo base.

t : el tiempo transcurrido desde el comienzo de la recesión (días).

Rendimiento o producción de agua: corresponde a la cantidad de agua generada en cada subcuenca y se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$WYLD = Q_{surf} + Q_{lat} + Q_{gw} - TLOSS - \text{pond abstractions}$$

Donde:

WYLD: rendimiento de agua (mm H₂O).

Q_{surf} : escorrentía superficial que llega al cauce (mm H₂O).

Q_{lat} : flujo lateral (mm H₂O).

Q_{gw} : agua subterránea que llega al cauce (mm H₂O).

TLOSS: Pérdidas de agua por recarga del acuífero (mm H₂O).

Ponds abstractions: abstracciones de caudal para embalsamientos (mm H₂O).

3.7. Calibración y validación del modelo

La calibración y el análisis de incertidumbre de modelos distribuidos de cuencas son temas que merecen la atención y la consideración cuidadosa de los investigadores [26]. Convencionalmente, la calibración se realiza de forma manual y consiste en cambiar los valores de los parámetros de entrada del modelo para producir valores simulados que están dentro de un cierto rango de los datos medidos [27]. Durante la calibración, estos parámetros se optimizan en un esfuerzo por aumentar la precisión y reducir la incertidumbre de predicción del modelo [28]. Sin embargo, cuando el número de parámetros utilizados en la calibración manual es grande, especialmente para modelos hidrológicos complejos, este tipo de calibración puede requerir gran cantidad de tiempo en su ejecución y puede no tener en cuenta las relaciones existentes entre los parámetros [27]. A este tipo de estrategia de calibración se le denomina determinista, por lo que el modelo se considera calibrado con éxito cuando replica datos observados dentro de un nivel adecuado de exactitud y precisión [28]. El proceso de validación consiste en verificar que, para un período de tiempo diferente al usado para el proceso de calibración, el modelo calibrado puede simular satisfactoriamente el comportamiento hidrológico de la cuenca modelada [28].

En los modelos hidrológicos se presentan diferentes tipos de calibraciones:

- **Determinista:** consiste en la prueba y error de los parámetros del modelo hasta que se obtienen algún tipo de coincidencia razonable entre los datos simulados y observados.
- **Estocástica:** este tipo de calibración se encuentra relacionado estrechamente a la incertidumbre ya que esta es la base del desarrollo del proceso y sin esta no tendría sentido, además, cualquier análisis con el modelo calibrado debe incluir la incertidumbre en el resultado al propagar las incertidumbres de los parámetros.

La eficiencia del modelo se puede evaluar mediante el cálculo de parámetros así:

- **Eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE)** es una estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual (ruido) en comparación con la varianza de datos medidos (información). NSE indica qué tan bien la trama de datos observados versus simulados se ajusta a la línea 1:1. Este indicador es altamente recomendado por la American Society of Civil Engineers (ASCE) [29].

El NSE es calculado como se muestra en la siguiente ecuación:

$$NSE = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{mean-obs})^2} \right)$$

NSE varía entre $-\infty$ y 1 (1 inclusive). NSE = 1 es el valor óptimo. Los valores entre 0.0 y 1.0 son generalmente vistos como niveles aceptables de rendimiento, mientras que los valores <0.0 indican que el valor medio observado es un mejor predictor que el valor simulado, indicando un rendimiento inaceptable [29].

- **Coeficiente Porcentaje PBIAS:** PBIAS (unidades m³/s) mide el promedio de la tendencia de los flujos simulados a ser más grande o más pequeña que sus contrapartes observadas; el valor óptimo es 0.0. Los valores positivos indican un sesgo del modelo hacia la subestimación, mientras que los valores negativos indican un sesgo hacia la sobreestimación [30].

$$PBIAS = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}} \right)$$

- **Coefficiente de determinación R²:** da una idea sobre qué tan bien la varianza de la medida los valores son replicados por las simulaciones del modelo. R² puede variar de 0 a 1 donde 0 indica que no hay correlación y 1 representa correlación perfecta [31].

$$R^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n ((Q_{obs} - Q_{mean-obs})(Q_{sim} - Q_{mean-sim}))}{(\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{mean-obs})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (Q_{sim} - Q_{mean-sim})^2)^{0.5}} \right)^2$$

Las variables de estos tres parámetros son:

n: número total de observaciones

Q_{obs}: descarga observada.

Q_{sim}: descarga simulada.

Q_{mean-obs}: es la media de los datos observados para el constituyente que se evalúa.

Q_{mean-sim}: es la media de los datos simulados para el constituyente que se evalúa.

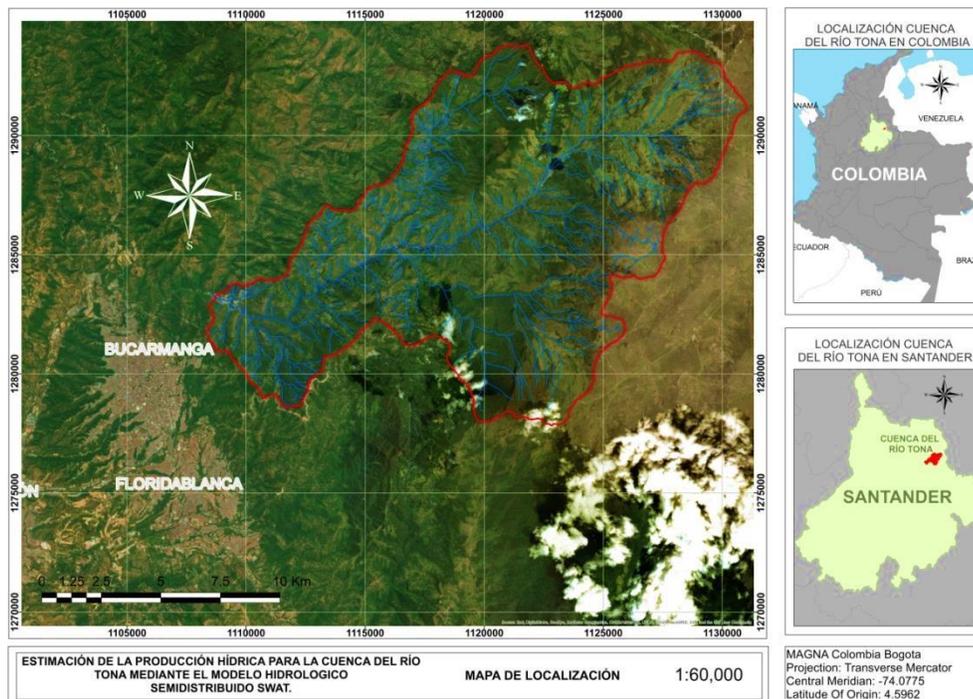
La *Tabla 3* resume la clasificación de la eficiencia de la calibración de un modelo hidrológico de acuerdo a los resultados de los parámetros NSE y PBIAS.

Clasificación	NSE	PBIAS
Muy bien	0.75 < NSE ≤ 1.00	PBIAS ≤ ±10
Bueno	0.65 < NSE ≤ 0.75	±10 ≤ PBIAS < ±15
Satisfactorio	0.50 < NSE ≤ 0.65	±15 ≤ PBIAS < ±25
Insatisfactorio	NSE ≤ 0.50	PBIAS ≥ ±25

Tabla 3. Valores de rangos para los indicadores de eficiencia NSE y PBIAS.
Fuente: Adaptada de Moriasi 2007 [29], tabla 4.

4. DESCRIPCIÓN DEL SITIO DE ESTUDIO

La cuenca hidrográfica del río Tona se encuentra al nororiente del departamento de Santander (Colombia), nace en el páramo de Santurbán del Macizo de Santander y desemboca en el río Suratá. Esta microcuenca, con una extensión aproximada de 192.50 km², hace parte de la macrocuenca del río Lebrija que realiza su descarga en el río Magdalena. La cuenca del Tona tiene una topografía montañosa de fuertes pendientes provocando que los flujos de agua corran con alta capacidad erosiva y de arrastre [5]. Geográficamente, la cuenca se localiza entre las coordenadas 1°108,703.70E – 1°283,182.80N y 1°131,012.23E – 1°291,092.40N, correspondiendo con las áreas más baja y alta de la cuenca, respectivamente, ya que el sistema hídrico drena con orientación sur-oeste (ver Mapa 1). La producción hídrica de esta cuenca es de gran importancia ya que provee aproximadamente un 50% del recurso hídrico requerido por los habitantes del área metropolitana de Bucaramanga, además de soportar la población rural de la misma.



Mapa 1. Localización geográfica de la cuenca del río Tona.
Fuente: Autor

4.1. Características generales de la cuenca

Los siguientes datos geométricos de la cuenca fueron tomados a partir del modelo de elevación digital exportado a archivo CAD.

- **Cota punto más alto:** 3850 msnm.
- **Cota punto más bajo:** 800msnm.
- **Área de la cuenca:** corresponde a la proyección en plano horizontal de la superficie delimitada por la divisoria de aguas o puntos más altos, con un valor de 192'496,560.39m² (192.50Km²).

Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT.

- **Perímetro de la cuenca:** medida tomada por la longitud de la superficie horizontal de la línea divisoria de aguas 75,424.12m – 75.42Km.
- **Longitud del cauce principal:** Longitud tomada de la superficie horizontal desde la salida hasta la parte superior de la cuenca con una longitud de 27,032.82m – 27.03Km.
- **Pendiente promedio:** corresponde al cociente entre diferencia entre el punto más alto de la cuenca y el más bajo correspondiente a la salida y la longitud del cauce principal.

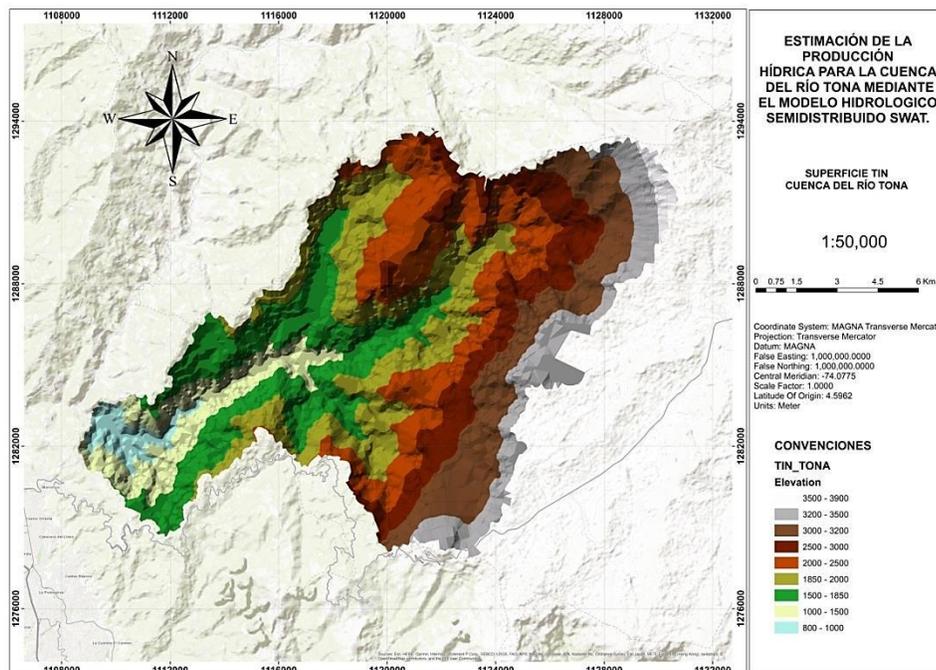
$$S = \frac{3850m - 800m}{27032.82m} 100\% = 11.28\%$$

- **Longitud axial:** longitud en el plano superficial de la cuenca medida desde el punto más bajo de la cuenca que corresponde a la salida hasta el punto más alto 23.375,18m – 23,38Km.
- **Ancho promedio:** se calcula a partir del cociente entre el área de la cuenca y la longitud axial.

$$A_p = \frac{A}{L_a} = \frac{192.50\text{Km}^2}{23.38\text{Km}} = 8.23\text{Km}$$

- **Forma de la cuenca:** La forma de la cuenca influye sobre los escurrimientos, es así como en una cuenca de forma oblonga y tipo embudo como la del Río Tona, los escurrimientos recorren los cauces secundarios hasta llegar a uno principal por lo que la duración del escurrimiento es superior.

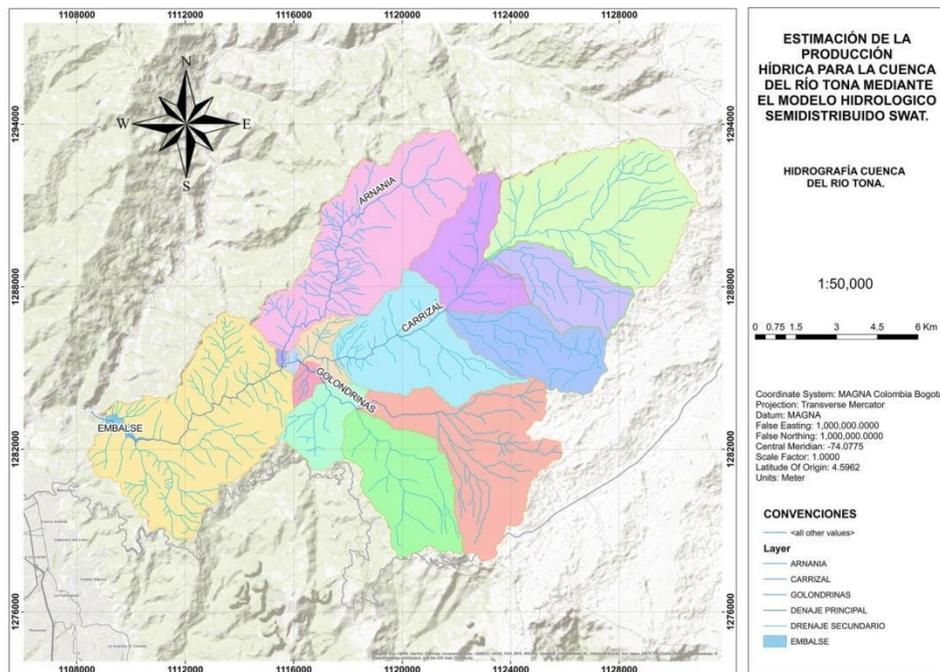
En el *Mapa 2* se presenta el modelo topográfico de la cuenca, clasificado por rangos de elevaciones.



Mapa 2. Modelo topográfico de la cuenca del río Tona.
Fuente: Autor

4.2. Hidrografía de la cuenca

La cuenca del río Tona cuenta con tres drenajes importantes (Arnania, Carrizal y Golondrinas) que alimentan la parte baja de la misma y sobre los cuales el acueducto metropolitano de Bucaramanga (amb) realiza captación por gravedad (1400 lps o 1.40 m³/s) para su sistema de abastecimiento. Adicionalmente, en el año 2015, el amb finalizó la construcción del embalse de Bucaramanga (capacidad de 18 millones de m³), localizado en la parte baja de la cuenca, buscando regular un caudal adicional de 1100 lps (1.1 m³/s). Aunque el llenado del embalse finalizó en el año 2016, aún no se ha construido la tubería de aducción que conectaría el embalse con dos plantas de tratamiento (Bosconia y Angelinos – en construcción). Se espera que esta infraestructura entre en funcionamiento a finales del año 2019. El *Mapa 3* muestra la red de drenaje de la cuenca y la localización del embalse de Bucaramanga. Las áreas de colores son las subcuencas delimitadas por el software ArcSWAT a partir de un análisis de redes de drenaje.



Mapa 3. Red de drenaje cuenca del río Tona.
Fuente: Autor

4.3. Uso y cobertura de la tierra en la cuenca del Tona

El uso de las tierras corresponde a todas las intervenciones, acciones y actividades sobre la cobertura superficial del terreno para modificar o mantener las condiciones existentes de una determinada zona a intervenir. Estas modificaciones pueden ser del tipo natural o artificial (antrópicas) [32]. Todas estas características son de gran relevancia dentro de los componentes del ciclo hidrológico de una cuenca hidrográfica, debido a que provocan diferentes respuestas en la dinámica del ciclo hidrológico, especialmente en la producción hídrica.

En la cuenca del Tona se identificaron diferentes usos y coberturas del suelo a partir del trabajo realizado por el Plan de Ordenamiento Ambiental de la cuenca - POAT (ver *Tabla 4*). Excepto por la cabecera municipal de Tona, el área de estudio pertenece al sector rural y en ella se han identificado diversos usos y cobertura de la tierra. De acuerdo a los datos del POAT, aproximadamente un 38% está dedicado a tierras agropecuarias, 12% a tierras agroforestales, 33% a bosque natural (secundario y rastrojos), 5% a bosque plantado, y 12% a formas especiales de vegetación (matorrales y herbáceas propias del ecosistema). Vale la pena aclarar que el amb ha hecho esfuerzos importantes en la compra de predios para proteger áreas estratégicas de la cuenca.

GRAN GRUPO Nivel Exploratorio	GRUPO Nivel Reconocimiento	SUBGRUPO Nivel Semidetallado	SIMB.	AREA Ha	AREA %
1. CONSTRUCCIONES	1.1 INFRAESTRUCTURA URBANA	a. Zona Urbana	ZU	9.98	0.1%
2. TIERRAS AGROPECUARIAS	2.1 CULTIVOS AGRICOLAS	a. Cultivos Transitorios	Ct	226.59	1.2%
		b. Cultivos Permanentes	Cp	239.83	1.2%
	2.2 POTREROS ABIERTOS	a. Pastos Naturales	P	2307.28	11.9%
		b. Pastos Mejorados	Pm	370.12	1.9%
	2.3 TIERRAS MIXTAS O MISCELÁNEAS	a. Cultivos y pastos	C-P	3123.08	16.1%
		f. Rastrojos y cultivos	R-C	1025.42	5.3%
3. TIERRAS AGROFORESTALES	3.1 SILVOPASTORIL	a. Potreros arbolados	Pa	2001.64	10.3%
	3.2 SILVOAGRICOLA	a. Cultivos permanentes o Semipermanentes con sombrío	SCp	396.91	2.0%
4. BOSQUES	4.1 BOSQUE NATURAL	a. Secundario	Bs	4495.63	23.2%
		b. Rastrojo	R	1985.07	10.2%
	4.2 BOSQUE PLANTADO	a. Coníferas y latifoliadas	BP	982.66	5.1%
5. FORMAS ESPECIALES DE VEGETACIÓN	5.1 MATORRAL	a. Paramuno	Mp	489.61	2.5%
	5.2 HERBACEAS	a. Pajonales	Hp	1721.26	8.9%
6. TIERRAS ERIALES	6.1 AFLORAMIENTO ROCOSO	a. Masivo	AR	1.92	0.0%
TOTAL				19,377	100%

*Tabla 4. Uso y cobertura de la tierra en la cuenca del Tona.
Fuente: POAT cuenca del Tona.*

4.4. Suelos

La clasificación de los suelos para la cuenca del Tona se deduce de una combinación entre resultados presentados por el POAT y la revisión de la base de datos de suelos de la FAO (SOTER) a través de ISRIC-World Soil Information [33]. El POAT, en su Anexo 2.3, presenta una clasificación por subcuencas a las que les asigna un máximo de tres horizontes de suelo con sus respectivas profundidades (mm), texturas, densidad aparente del suelo (t/m^3), capacidad de agua disponible (mm), conductividad saturada (mm/hr) y porcentajes granulométricos. Esta información, aunque valiosa, no es suficiente para satisfacer los requerimientos de información de SWAT. La incorporación de propiedades provistas por la base de datos SOTER y el uso del software SPAW (Soil-Plant-Atmosphere-Water Field and Pond Hydrology) [34], permitieron completar la base de datos requerida por SWAT para sus cálculos (los atributos del mapa de suelos se encuentran en el Anexo 1). El mapa de suelos tiene entonces 14 subáreas con tipos de suelo CO56 (clasificación SOTER) pero con las particularidades ofrecidas por la disgregación hecha por el POAT. El mapa de suelos desarrollado se presenta en la sección de metodología.

4.5. Climatología

La climatología de la cuenca del Tona se puede describir a partir de los resultados del POAT. La cuenca, aunque relativamente pequeña, presenta distribuciones espaciales y temporales de precipitación y temperatura definidas por el carácter bimodal de las lluvias en la zona tropical, por su topografía escarpada con un rango amplio de elevaciones, y por los ecosistemas que en ella se presentan. Las Figuras 4 y 5 tomadas del POAT, muestran isoyetas e isotermas para promedios anuales de precipitación y temperatura, a partir de datos climatológicos de estaciones localizadas dentro de la cuenca.

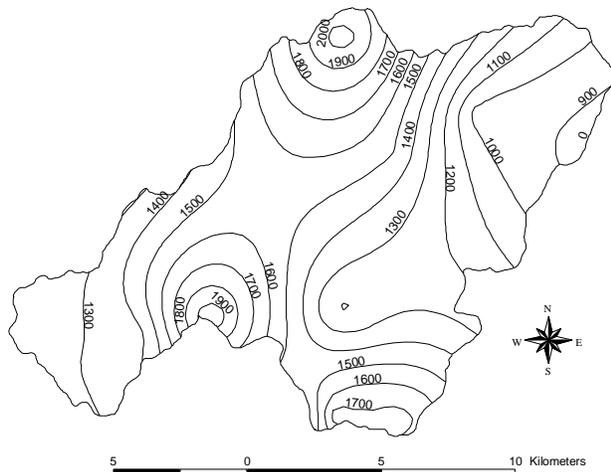


Figura 4 .Curvas isoyetas cuenca del Tona.
Fuente: POAT Tona

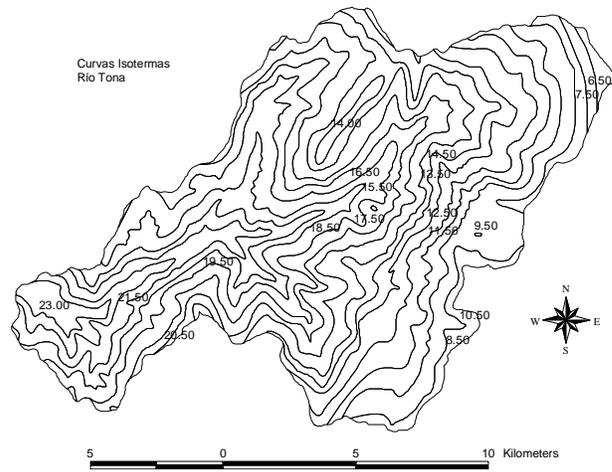


Figura 5 . Curvas isotermas cuenca del Tona.
Fuente: POAT Tona

La distribución espacial de precipitación varía entre 900 a 2000 mm anuales, siendo las zonas de menor precipitación la que corresponde al ecosistema de páramo (nor-este de la cuenca) y la parte baja de la cuenca (oeste). En cuanto a temperatura, existe una tendencia general de incremento de la temperatura en sentido nor-este a sur-oeste. El rango de temperaturas varía entre 6 a 23°C. La evapotranspiración potencial para esta zona, de acuerdo al Atlas Climatológico de Colombia (1981-2010), puede variar espacialmente entre 1000-1400 mm [35].

5. METODOLOGÍA

La evaluación de la producción hídrica de la cuenca usando la herramienta de modelación SWAT requirió esfuerzos importantes en las fases de recolección y procesamiento de información, preparación de los datos de entrada al modelo, calibración y validación del modelo para el escenario presente mediante datos climatológicos observados y finalmente, corrida del modelo para los diferentes escenarios futuros. El procesamiento y preparación de la información de entrada al modelo requirió el uso de paquetes de software especializado (Microsoft Excel, AutoCAD y ArcGIS); la modelación se realizó usando una extensión para ArcGIS del modelo hidrológico semidistribuido SWAT (ArcSWAT 2012), y la calibración se llevó a cabo usando dos estrategias: la estrategia automática (estadística) provista por la herramienta SWAT CUP versión 2012 y la estrategia manual (determinista) provista por la herramienta ArcSWAT. Esta sección del documento presenta en detalle el trabajo realizado para cumplir con los objetivos propuestos.

5.1. Etapa I: Información de entrada al modelo correspondiente a la zona de estudio

Esta etapa consistió en la identificación y preparación de la información requerida para el estudio. Las fuentes de información fueron entidades oficiales que tienen influencia en el área de la cuenca del río Tona como el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga (amb), que toma agua de esta fuente hídrica para el suministro del servicio de acueducto; la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), entidad ambiental de la región; y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), entidad nacional a cargo del monitoreo de datos hidroclimatológicos.

La descripción del trabajo se presenta en el contexto de los requerimientos de ArcSWAT para la modelación. La *Tabla 5* presenta un listado de los requerimientos básicos para realizar la modelación hidrológica. Las columnas 1 y 2 muestran el tipo de archivo y su formato de ingreso al modelo, y la columna 3 presenta una descripción sobre los mismos. Es indispensable que todos los mapas tengan el mismo sistema de coordenadas (MAGNA Colombia Bogotá, para nuestro caso).

Item	Formato (file name)	Descripción
Digital Elevation Model	ESRI GRID (dem)	Modelo digital de elevación de la cuenca (formato GRID)
Land Cover/Land Use	ESRI GRID, Shapefile (lulc)	Mapa de uso y cobertura del suelo (formato GRID)
Land use look up table	dBase or ASCII (lulct)	Tabla que asocia los usos del mapa de uso y cobertura del suelo con los usos existentes en la base de datos SWAT (formato dbf)
Soils	ESRI GRID, Shapefile (soil)	Mapa de suelos (formato GRID)
Soil look up table	dBase or ASCII (soilt)	Tabla que asocia los tipos de suelo del mapa de suelos con los suelos existentes en la base de datos SWAT (formato dbf)
Precipitation gauge location table	ASCII Only (pcptona)	Tabla de coordenadas geográficas de la(s) estación(es) de precipitación (formato txt)
Daily precipitation data table	ASCII Only	Tabla(s) que contienen la(s) serie(s) de tiempo de precipitación (formato txt)
Temperature gauge location table	ASCII Only (tmptona)	Tabla de coordenadas geográficas de la(s) estación(es) de temperatura (formato txt)
Daily temperature data table	ASCII Only	Tabla(s) que contienen la(s) serie(s) de tiempo de temperatura máxima y mínima (formato txt)
Gauging station points location table	dBase or ASCII (strflowtona)	Tabla que contiene la localización geográfica de los puntos de monitoreo de caudal (formato dbf)

Tabla 5. Archivos de entrada para la modelación hidrológica en SWAT (requerimientos mínimos).

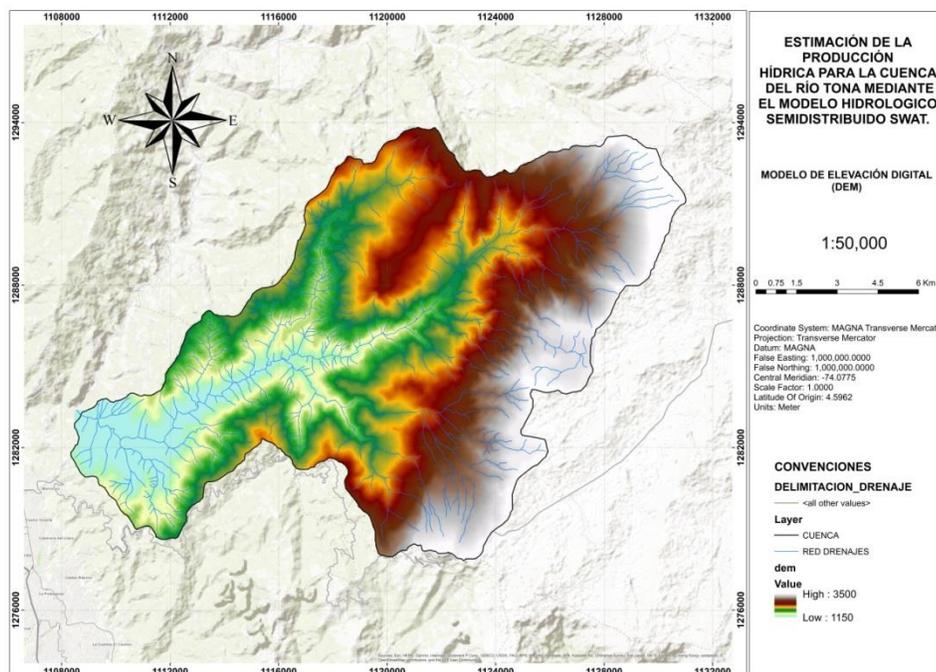
Fuente: ArcSWAT Interface For SWAT 2012 User's Guide [36].

5.1.1. GRID—Modelo Digital de Elevación (dem)

La elaboración del raster-DEM de la cuenca del Tona se llevó a cabo a partir de la cartografía proporcionada por la CDMB en formato CAD (escala 1:25000). Las herramientas de conversión que ofrece ArcGIS permitieron obtener el DEM a partir de un mapa de curvas de nivel. La definición de la resolución del DEM (y por consiguiente de todos los demás rásters) se basó en el método del reconocido cartógrafo analítico Waldo Tobler (1987) que explica que la resolución del DEM se determina por medio de una expresión matemática basada en la escala de la cartografía.

$$\text{Resolución raster} = \frac{\text{Escala}}{2 * 1000} \rightarrow \frac{25000}{2 * 1000} = 12.5\text{m}$$

Aplicando la anterior fórmula se determinó la resolución del DEM de 12.50m x 12.50m con un área de pixel de 156.25m². El *Mapa 4* muestra el modelo digital de elevación desarrollado para entrada al modelo.



Mapa 4. Modelo digital de elevación (DEM) de la cuenca del río Tona.

Fuente: Autor

5.1.2. GRID—Cobertura y Uso de la tierra (lulc)

El GRID de uso y cobertura de la tierra de la cuenca del Tona se obtuvo a partir de la cartografía en AutoCAD del POAT. La clasificación es la que se presentó en la sección 4.3, específicamente a nivel de subgrupo semidetallado. El trabajo realizado consistió en transformar el mapa de formato CAD a GRID (ver *Mapa 5*), usando las herramientas de ArcGIS (resolución del ráster de 12.50m x 12.50m), y en definir la equivalencia entre los diferentes usos y coberturas identificadas por el POAT con respecto a la base de datos de usos y coberturas de SWAT (ver *Tabla 6*). La base de datos de uso y cobertura en SWAT contiene un sinnúmero de atributos para cada una de las categorías, que se identifican por un código de cuatro letras. Por ejemplo, la categoría de cultivos de café (coffee) se identifica con el código "COFF". Para nuestro caso específico, vale la pena comentar que la cobertura de "matorral paramuno", que es una forma especial de vegetación de la zona paramuna del trópico, no tiene un equivalente en la base de datos de uso y cobertura del suelo de SWAT. A partir de discusiones electrónicas con Jefferson Valencia Gómez, M.Sc., del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), se incluyó una nueva categoría para identificar esta cobertura vegetal (FESP), a partir de una categoría existente

(FESC). Adicionalmente, la asignación de equivalencias se benefició del trabajo desarrollado por el CIAT para un estudio de calibración de parámetros en cuencas andinas [37]. La tabla de equivalencias es la siguiente:

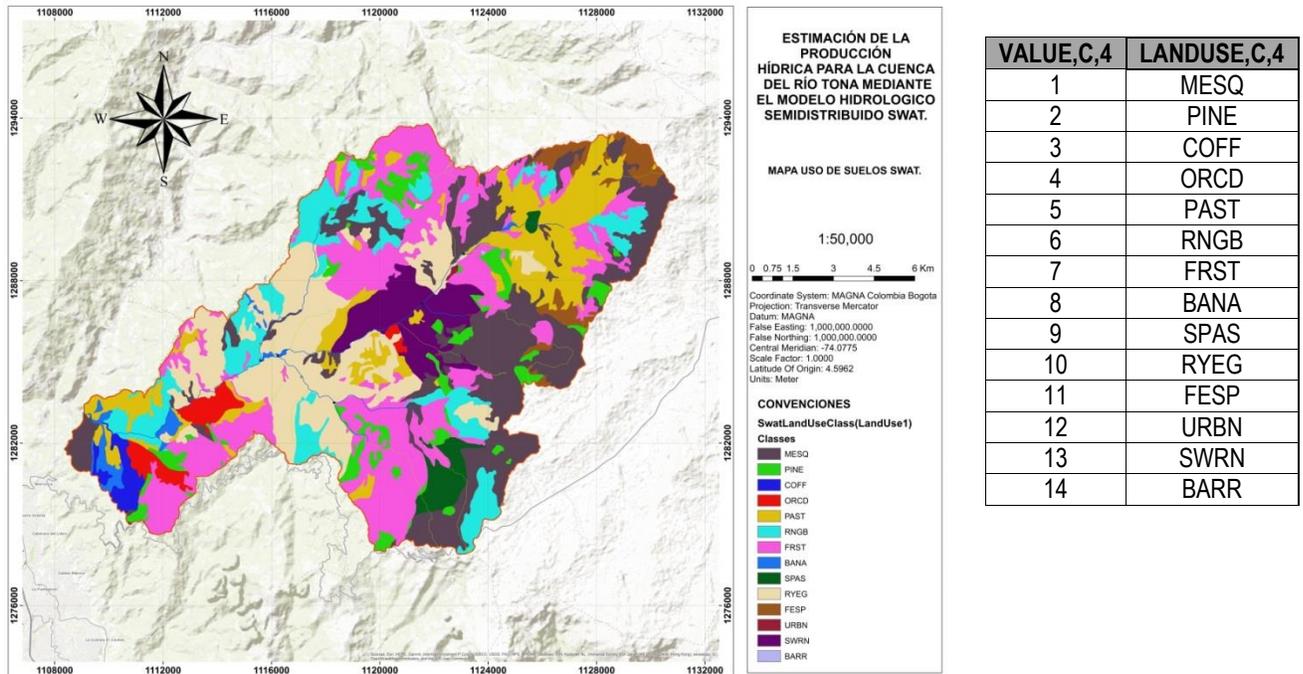
SUBGRUPO / Nivel Semidetallado	Símbolo mapa	Código SWAT	Definición del código en la base de datos SWAT	Código GRID
Zona Urbana	ZU	URBN	Urban	12
Cultivos agrícolas transitorios	Ct	BANA	Bananas	8
Cultivos agrícolas permanentes	Cp	COFF	Coffee	3
Pastos Naturales	P	PAST	Pasture	5
Pastos Mejorados	Pm	SPAS	Summer pasture, Cultivated pasture	9
Tierras mixtas, cultivos y pastos	C-P	RYEG	Italian(annual) Ryegrass, Patterns of permanent crops and pastures	10
Tierras mixtas, rastrojos y cultivos	R-C	SWRN	Southwestern US (Arid) Range, Patterns of permanent crops, pastures,	13
Silvopastoril, potreros arbolados	Pa	RNGB	Range-Brush	6
Silvoagrícola, cultivos permanentes o semipermanentes con sombrío	SCp	ORCD	Orchard	4
Bosque natural, secundario	Bs	FRST	Forext-Mixed	7
Bosque natural, rastrojo	R	MESQ	Honey mesquite, Shrub and/or herbaceous vegetation associations	1
Bosque plantado, coníferas y latifoliadas	BP	PINE	Pine, planted forest	2
Matorral paramuno	Mp	FESP	Paramuno vegetation	11
Herbáceas, pajonales	Hp	MESQ	Honey mesquite, Shrub and/or herbaceous vegetation associations	1
Afloramiento rocoso masivo	AR	BARR	Barren	14

Tabla 6. *Equivalencias entre usos y coberturas de la cuenca del Tona y la base de datos SWAT*
Fuente: Proyecto de Investigación 086-0117-2300.

Land use look up table (lulct): Corresponde a la tabla ingresada al modelo en formato (.dbf), donde se especifican las categorías de los usos de suelo de tipo urbano o rural que se van a modelar de acuerdo al tipo de uso que se encuentra en el mapa (identificados con un número, en este caso, del 1 al 14), y el código SWAT correspondiente.

El *Mapa 5* muestra, a la izquierda, el mapa en formato GRID del uso y cobertura del suelo para la cuenca del Tona donde ya se evidencian los usos SWAT, de acuerdo con la asociación entre los códigos del GRID y la base de datos SWAT, y a la derecha, la tabla “look up” generada.

Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT.



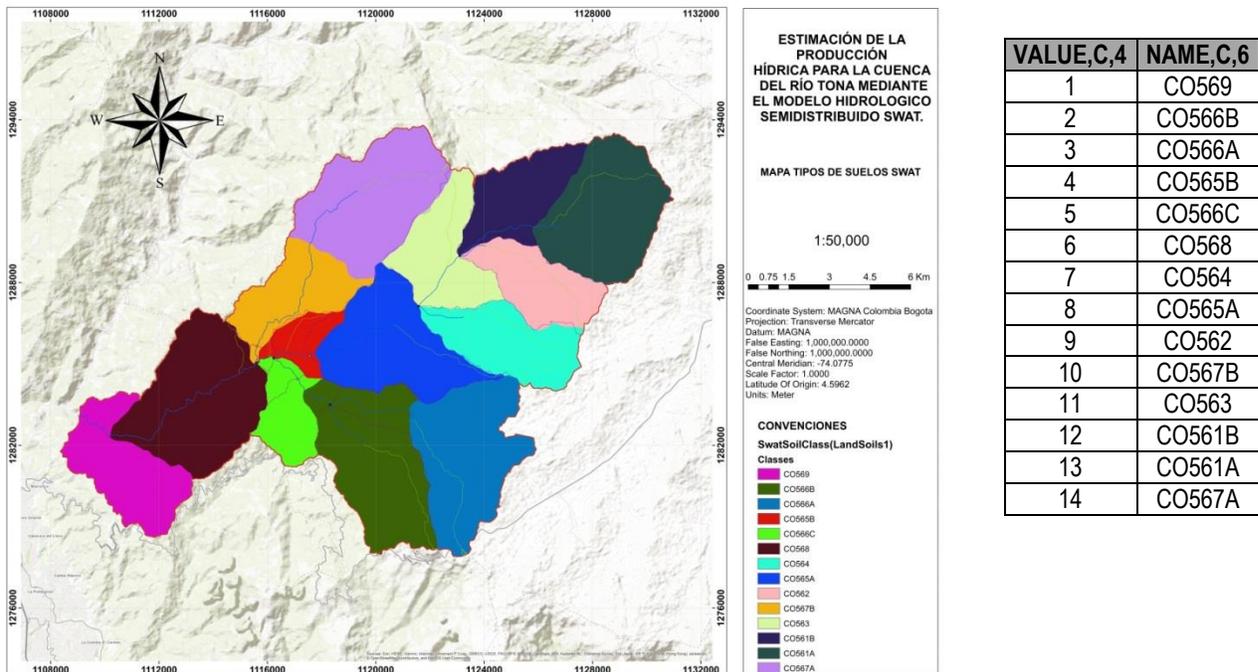
Mapa 5. Mapa de uso y cobertura de la tierra junto con su tabla "look up" correspondiente.
Fuente: Autor y Proyecto de Investigación 086-0117-2300.

5.1.3. GRID—Suelos (soil)

El GRID de suelos de la cuenca se obtuvo a partir del análisis descrito en la sección 4.4. Se generó un mapa de suelos para la cuenca con sus respectivos atributos, de acuerdo con los requerimientos de SWAT. Igual que para el caso de uso y cobertura del suelo, el trabajo consistió en generar un GRID de la clasificación de los suelos de la cuenca (resolución del ráster de 12.50m x 12.50m) junto con una tabla de equivalencias entre las categorías del mapa y las nuevas categorías de suelos creadas en la base de datos de SWAT.

Land use look up table (soilt): Corresponde a la tabla ingresada al modelo en formato (.dbf), donde se especifican las categorías de los suelos como se identifican en el mapa (identificados con un número del 1 al 14), y su correspondencia con la clasificación en la base de datos SWAT. El *Mapa 6* muestra, a la izquierda, el mapa de suelos en formato GRID donde ya se evidencian los tipos de suelo de acuerdo con la clasificación realizada y agregada a la base de datos SWAT, y a la derecha, la tabla "look up" que asocia los códigos SWAT con los códigos del GRID.

Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT.



Mapa 6. Mapa de suelos junto con su tabla “look up” correspondiente.
Fuente: Autor y Proyecto de Investigación 086-0117-2300.

5.1.4. Datos de precipitación

En términos de precipitación SWAT requiere series históricas para una o varias estaciones, y una tabla que provea la localización geográfica de las mismas. Para el caso de la cuenca del Tona, se obtuvieron datos de precipitación del IDEAM (estaciones UIS, Berlín y Tona) y del amb (estaciones El Brasil y La Galvicia). Aunque existen otras estaciones en la zona de influencia de la cuenca, se trabajó con las estaciones que pudieran ofrecer datos para un período de tiempo común. El ejercicio de análisis de los datos disponibles permitió identificar que estas estaciones tenían datos completos¹ para el período 1987-2002. La *Tabla 7* presenta los datos de localización geográfica y elevación para las cinco estaciones que proporcionaron datos de precipitación. Esta tabla fue elaborada como entrada al modelo en formato (.txt) y su nombre es “pcptona.txt”.

ID	NAME	LAT	LONG	ELEVATION
1	pbrasil	7.143	-73.055	1662
2	pberlin	7.187	-72.869	3214
3	puiside	7.145	-73.122	1018
4	ptonapu	7.183	-72.697	1910
5	pgalvic	7.117	-73.05	1779

Tabla 7. Localización geográfica y elevación de las estaciones con datos de precipitación.
Fuente: Proyecto de Investigación 086-0117-2300

Tabla de datos diarios de precipitación: Para cada estación de la *Tabla 7* se creó un archivo que contiene la serie histórica de datos diarios de precipitación. Estos archivos tienen un requerimiento de formato especial que incluye, en la primera línea, la fecha correspondiente al primer registro de la serie con el formato (AAAAMMDD), y seguido, en filas sucesivas, los datos diarios de precipitación para el período de análisis (19870101 - 20021231). Estos archivos tienen extensión (.txt) y se reportan en (mm/día). La *Tabla 8* presenta una muestra de la serie de datos diarios de precipitación observados. La primera fila de la tabla indica el nombre del archivo, la segunda fila

¹ El máximo período de datos faltantes fue 15 días. Para esos casos se utilizó el método de interpolación de IDW (inverse distance weighting) para completar las series de tiempo.

de la tabla muestra la primera fila de cada uno de los archivos, y las siguientes filas muestran cómo se ven los datos en cada uno de los archivos.

pberlin	pbrasil	pgalvic	puiside	ptonapu
19870101	19870101	19870101	19870101	19870101
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	13.2	0.0
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.0	0.0	0.0	3.2	0.0

Tabla 8. Ejemplo de datos para las tablas de precipitación observada en cinco estaciones.
Fuente: Proyecto de Investigación 086-0117-2300.

5.1.5. Datos de temperatura

Igual que para el caso de la precipitación, SWAT requiere series históricas de temperatura para una o varias estaciones, y una tabla que provea la localización geográfica de las mismas. Para el caso de la temperatura, para el período 1987-2002, solo se tuvieron disponibles datos de dos estaciones del IDEAM (UIS y Berlín). La *Tabla 9* presenta los datos de localización geográfica y elevación para las dos estaciones. De la misma manera que para la precipitación, la tabla fue elaborada en formato (.txt) y su nombre es "tmptona.txt".

ID	NAME	LAT	LONG	ELEVATION
1	pberlin	7.187	-72.869	3214
2	puiside	7.145	-73.122	1018

Tabla 9. Localización geográfica y elevación de las estaciones con datos de temperatura.
Fuente: Proyecto de Investigación 086-0117-2300

Tabla de datos diarios de temperatura: Estas tablas se diferencian de las tablas de precipitación en cuanto a que se requiere, para cada día, el registro de temperatura máxima y mínima. Entonces, para cada una de las dos estaciones, se creó un archivo que contiene, en la primera fila, la fecha correspondiente al primer registro de la serie con el formato (AAAAMMDD), y seguido, en filas sucesivas, los datos diarios de temperatura máxima y mínima, separados por coma. Estos archivos también tienen extensión (.txt) y se reportan en grados centígrados (°C). La *Tabla 10* presenta una muestra de la serie de datos diarios de temperatura máxima y mínima para cada estación. La primera fila de la tabla indica el nombre del archivo, la segunda fila de la tabla muestra la primera fila de cada uno de los archivos, y las siguientes filas muestran cómo se ven los datos en cada uno de los archivos

tberlin	tuiside
19870101	19870101
13.0,0.4	28.2,18.8
13.0,0.2	28.8,19.8
14.0,1.2	26.6,19.8
13.0,1.6	24.6,19.2

Tabla 10. Ejemplo de datos para las tablas de temperatura observada en dos estaciones.
Fuente: Proyecto de Investigación 086-0117-2300

5.1.6. Información hidrométrica

Los datos observados de caudal no son usados como entrada al modelo sino como herramienta para la calibración de este. Hasta el año 2011, antes del inicio de la construcción del embalse de Bucaramanga, en la cuenca del río Tona existieron cuatro puntos de monitoreo de caudal; tres en la parte alta, aguas arriba de las bocatomas de los afluentes Armania, Carrizal y Golondrinas, y uno en la parte baja de la cuenca, en el sitio conocido como Puente Tona. Estos datos de caudal han sido recolectados por el amb. Actualmente, se

conservan los tres puntos de monitoreo en los afluentes, entre 2011-2014 se monitoreó el caudal en un punto aguas abajo de la confluencia de los afluentes, y desde el 2014 se monitorea el caudal en el punto conocido como “cola del embalse”.

SWAT permite el ingreso de coordenadas de puntos de monitoreo y de esta manera, reporta los caudales modelados en dichos puntos. Esto hace posible que, durante el proceso de calibración, o en el proceso de modelamiento de escenarios, el usuario pueda tener acceso a los caudales en dichos puntos. Igual que para el caso de las estaciones climatológicas, es necesario preparar un archivo que contenga la información de localización de dichas estaciones. La *Tabla 11* muestra la estructura del archivo denominado (strflowtona.dbf) que contiene la información de las estaciones de monitoreo de caudal.

Estación	XPR,N,9,0	YPR,N,11,0	LAT,N,19,11	LONG,N,19,11	TYPE,C,2 ²
Armania	1115616	1285661	7.17816155	-73.0308212	O
Carrizal	1117555	1285289	7.17476041	-73.0132766	O
Golondrinas	1117109	1284445	7.16714051	-73.0173252	O
Puente Tona	1109073	1283103	7.15516238	-73.0900972	O

Tabla 11. Localización de las estaciones de monitoreo de caudal en la cuenca del Tona.
Fuente: autor a partir de información proporcionada por el amb.

Después de haber trabajado en los procesos de calibración de la cuenca, se encontraron dificultades en la calibración del modelo por sectores, al tratar de comparar los caudales de los sectores de la parte alta con los caudales observados en las estaciones Armania, Carrizal y Golondrinas. Fue necesario entonces, discutir esta situación con funcionarios del amb, quienes explicaron que el proceso de aforo de caudales se ha ido tecnificando en los últimos años (específicamente desde el 2011) y que posiblemente, los datos de caudal para las estaciones de la parte alta no son tan verídicos, especialmente para el caso de caudales altos. Fue necesario entonces tomar la decisión de hacer una calibración global de la cuenca, usando únicamente los datos de caudal de la estación Puente Tona.

Caudales observados de la estación Puente Tona:

La serie histórica de caudales suministrados por parte del amb para la estación Puente Tona tiene una periodicidad diaria desde el 2 de octubre de 1984 hasta el 29 de agosto del 2015. Estos datos fueron de especial importancia para la comparación con los datos simulados arrojados por el modelo durante el proceso de calibración. Dado que los datos de salida de SWAT tienen una periodicidad mensual, fue necesario estimar los caudales mensuales promedio. Para esto, primero fue necesario completar la serie histórica de caudales diarios. Este proceso fue un poco complejo dado que no se contaba con datos de caudal de otras estaciones similares y que la variedad de datos incompletos estuvo entre un par de días hasta períodos de hasta un mes. La estrategia para el llenado de datos fue la siguiente:

- Para el caso de datos diarios faltantes menores a 10 días, estos se completaron empleando datos diarios de caudales para períodos similares que hayan tenido precipitaciones mensuales similares a la del mes con datos faltantes.
- Para el caso de datos diarios faltantes mayores a 10 días, la estrategia partió de la revisión de precipitaciones mensuales acumuladas así:

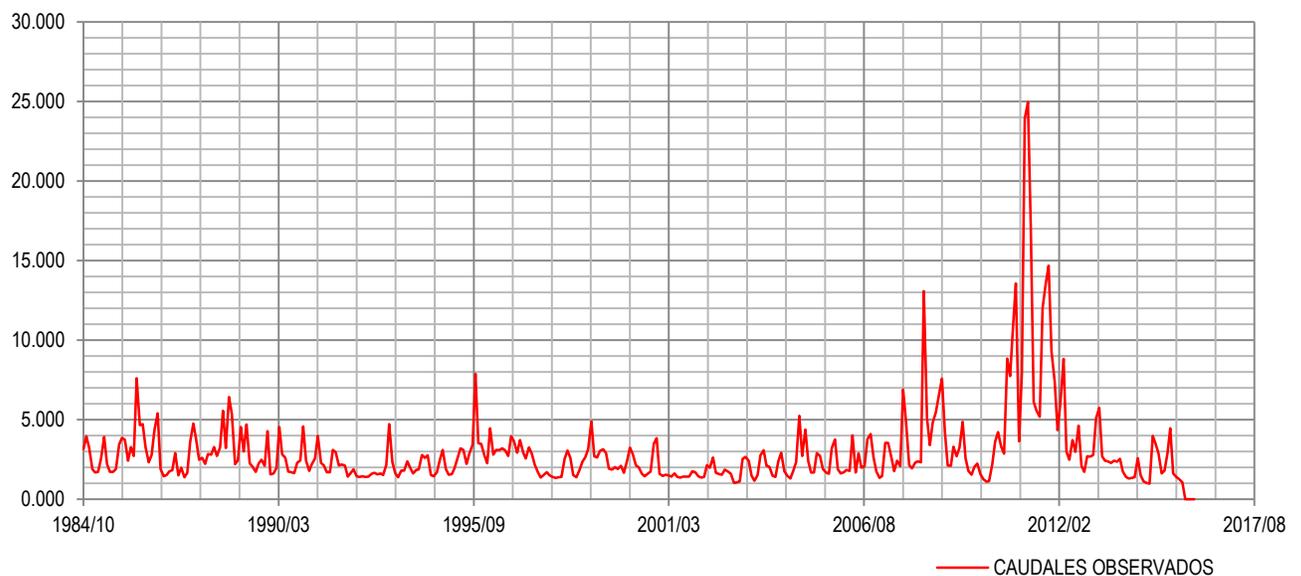
² La quinta columna de la tabla indica que al punto se le asigna la característica de punto de salida de una subcuenca (O = outlet).

Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT.

- A la precipitación mensual acumulada del mes “A” del año “YYYY” para el que faltaban datos de caudal se le calculó un rango de variación de $\pm 25\%$.
- Se identificaron meses “A” para todos los años con información disponible, que tuvieran valores de precipitación mensual acumulada en el rango establecido por el ítem anterior.
- Para esos meses específicamente, se calculó un promedio de los caudales medios mensuales.
- Este valor promedio mensual se asignó como caudal medio mensual para el mes “A” del año “YYYY”.
- Para completar los datos diarios de un período específico, se dejaron los valores de caudal que existían y para los días sin información, se asignó el valor de caudal medio mensual asignado en el ítem anterior.
- El ejercicio tuvo cuidado de no usar meses “A” a los que se le completó información, para completar los datos de otros meses “A”.

La *Gráfica 1* muestra la serie de caudal medio mensual para el período 1984-2015. Es importante mencionar que el procedimiento anterior para completar los datos, puede generar alta incertidumbre dentro del proceso de calibración y validación del modelo.

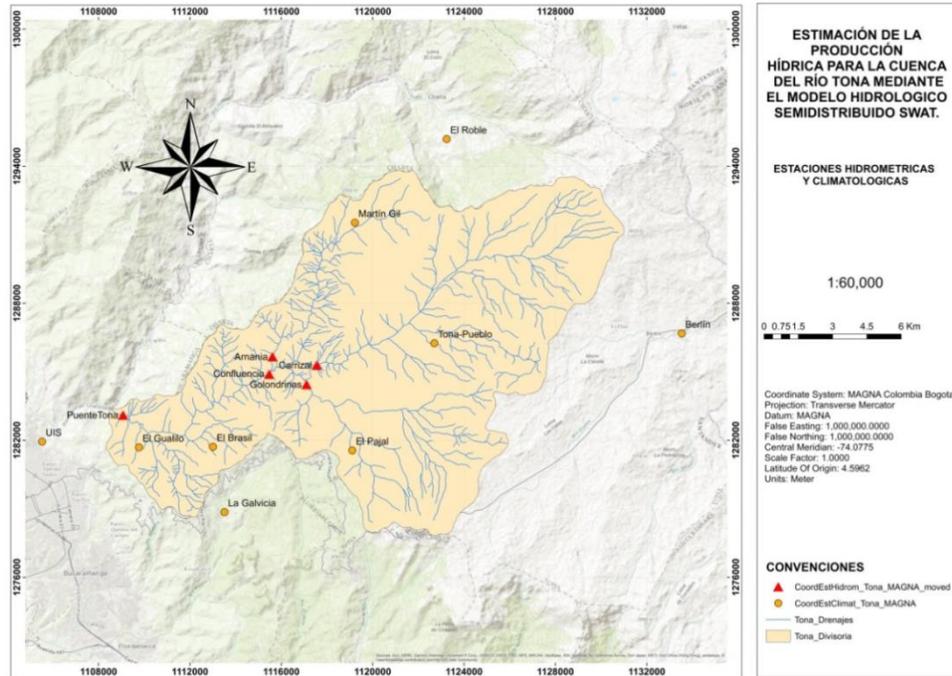
CAUDALES OBSERVADOS



Gráfica 1. Caudales promedios mensuales para la estación Puente Tona.

Finalmente, el *Mapa 7* muestra la ubicación de las estaciones hidrométricas (triángulos rojos) y climatológicas (precipitación, temperatura) en la zona de influencia de la cuenca del Tona.

Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT.



Mapa 7. Localización geográfica de estaciones de monitoreo de información hidrométrica y climatológica de la cuenca del río Tona.

5.2. Etapa II: Ingreso de información a la interface ArcSWAT y primera corrida del modelo

Esta etapa se ejecutó con los datos de entrada desarrollados en la etapa I, que fueron organizados en sus respectivos formatos para posteriormente cargarse al modelo SWAT mediante la interfaz ArcSWAT del software ArcGIS. Los archivos se cargaron siguiendo el procedimiento específico que tiene el modelo, ya que este se desarrolla por fases en donde el paso siguiente se activa una vez el anterior a ese es desarrollado adecuadamente.

El modelo se inició con la creación del proyecto, seguido de la delineación de la cuenca y las subcuencas. Estas fueron calculadas por el programa de acuerdo a un parámetro de área mínima para la creación de drenajes. Posteriormente, se ejecutó el cálculo de parámetros morfométricos; la creación de las unidades de respuesta hidrológica (HRU), mediante la combinación de información del uso del suelo, tipos de suelos y pendientes calculadas con los contornos del DEM; el proceso siguió con el ingreso de información climatológica y creación de tablas de la base de datos para el cálculo de los eventos a analizar. Posteriormente, se editaron parámetros físicos en el modelo con el fin de mejorar la eficiencia en los resultados generados.

Para el inicio del montaje del modelo hidrológico de la cuenca del río Tona se creó el proyecto en la interfaz de ArcSWAT para ArcGIS, mediante la extensión del programa en (SWAT Project Setup – New Project). En la Figura 6 se presentan los menús principales de ArcSWAT. El proceso de montaje y corrida del modelo sigue el orden de los menús de tal manera que se inicia con “SWAT Project Setup” y se finaliza con “SWAT Simulation”. La dinámica del montaje y corrida del modelo se presenta en estas secciones.

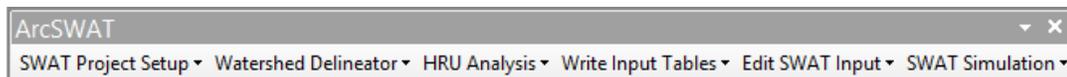


Figura 6. Menús principales de la interface de ArcSWAT.

5.2.1. Delineación de la cuenca

La delineación de la cuenca corresponde a la primera etapa en la ejecución del modelo (ver Figura 7). Se realizó mediante la pestaña (Watershed Delineator), donde se empleó como información de entrada, el modelo de elevación digital (DEM) para generar la red de drenajes y las subcuencas; así mismo se emplearon un archivo máscara (amask) para facilitar el proceso de delimitación de la cuenca y un archivo shape (burnin) para el mejoramiento de la demarcación de la red de drenaje.

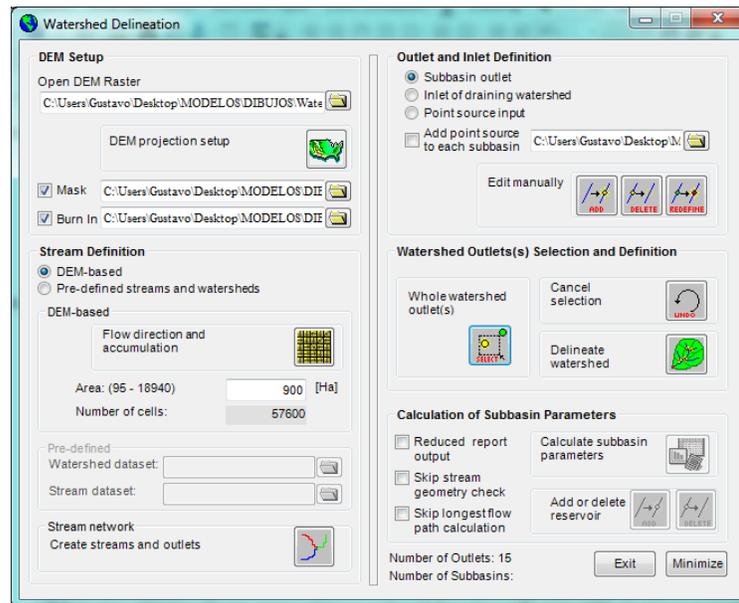


Figura 7. Ventana de delineación de la cuenca watershed Delineation.

Una vez ingresados estos archivos, se ejecutó el cálculo de la dirección y acumulación del flujo (“Flow direction and accumulation”) y en respuesta a esto, el software arrojó un rango de áreas de drenaje para la creación de corrientes. Para el caso de la cuenca del Tona, el rango arrojado fue de 95 a 18940 hectáreas. Se definió un valor de 900 hectáreas que corresponden a 57600 celdas en el DEM. Este valor surgió a partir de un proceso iterativo que buscaba obtener un número de subcuencas adecuado y comparable con las subcuencas definidas en el POAT.

Posteriormente, se realizaron los siguientes procedimientos: Creación de la red de drenajes mediante la opción “create streams and outlets”; a continuación, se ingresó el archivo “strflowtona” que contiene las coordenadas geográficas de los puntos de monitoreo de caudal por parte del amb (útiles para la verificación de los caudales observados y modelados). Este ingreso de datos se realizó en el submenú “Outlet and Inlet Definition / Subbasin outlet”. Una vez finalizado este proceso, se indicó en el DEM el punto de salida de toda la cuenca (“Whole watershed outlet(s)”). Se completó el proceso de delineación de la cuenca al activar la función “Delineate watershed”. Finalmente, la aplicación permitió generar parámetros para la cuenca y sus 14 subcuencas (“Calculate subbasin parameters”). La Figura 8 muestra las 14 subcuencas delimitadas y la Tabla 12 muestra el reporte topográfico de las mismas.

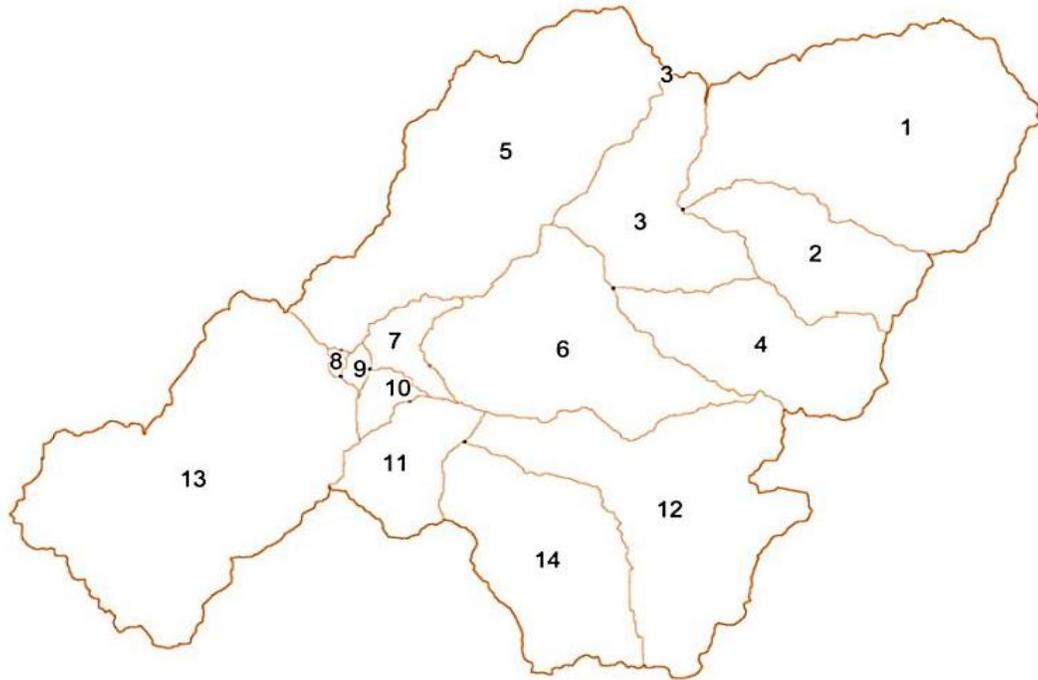


Figura 8. Subcuencas delimitadas por ArcSWAT para la cuenca del Tona.

Subcuencas	Área (ha)	Elevación mínima (msnm)	Elevación máxima (msnm)	Elevación promedio	Desviación
1	2791.50	1950.00	3898.00	2964.93	421.06
2	966.70	1950.00	3450.00	2800.38	386.64
3	1146.56	1700.00	2900.00	2259.19	244.06
4	1192.20	1700.00	3500.00	2919.11	497.06
5	2886.80	1400.00	2800.00	2096.74	284.88
6	1764.70	1400.00	3350.00	2034.86	368.22
7	256.05	1300.00	1950.00	1554.18	146.24
8	22.61	1250.00	1560.00	1396.10	74.93
9	47.17	1250.00	1600.00	1398.47	88.40
10	137.14	1300.00	1950.00	1541.51	150.07
11	621.03	1400.00	2400.00	1820.29	224.09
12	2215.02	1550.00	3500.00	2925.12	437.36
13	3365.88	800.00	2300.00	1486.51	292.56
14	1481.94	1550.00	3500.00	2506.48	450.69

Tabla 12. Parámetros morfométricos de las subcuencas del Tona.

Características del canal: SWAT asume que los canales principales o cauces tienen una forma trapezoidal [9], las variables que se emplearon para el cálculo hidráulico se presentan en la Tabla 13.

Subcuencas	CH_W2 (m)	CH_D (m)	CH_S2 (m/m)	CH_L2 (Km)	CH_N2
1	9.51	0.49	0.133742729	4.49	0.014
2	5.03	0.32	0.092963427	1.18	0.014
3	13.33	0.62	0.097374814	2.57	0.014
4	5.71	0.35	0.206588935	1.94	0.014
5	9.70	0.50	0.058245701	8.71	0.014
6	17.70	0.74	0.059148345	5.07	0.014
7	18.04	0.75	0.063085919	1.59	0.014
8	9.75	0.50	0.202657504	0.74	0.014
9	23.51	0.90	0.059971377	0.83	0.014
10	12.59	0.59	0.077446988	1.29	0.014
11	12.35	0.59	0.081389812	1.84	0.014
12	8.28	0.45	0.207674573	3.86	0.014
13	29.95	1.06	0.046874436	9.60	0.014
14	6.50	0.38	0.155844281	2.25	0.014

Tabla 13. Dimensiones de los canales principales.

Donde:

CH_W2: Anchura del canal en la parte superior del banco (m).

CH_D: Profundidad de agua en el canal cuando se llena el banco (m).

CH_S2: Inclinación promedio del canal a través de la longitud del canal (m/m).

CH_L2: Longitud del canal principal (Km).

CH_N2: valor “n” de Manning para el canal principal.

5.2.2. Definición de las unidades de respuesta hidrológica (HRU)

Este trabajo consistió en determinar las zonas o puntos de las subcuencas que contaban con la misma combinación de uso de la tierra, tipos de suelo y pendientes. Estas combinaciones únicas son agrupadas, a nivel de subcuenca, mediante las HRU's. La opción de definición de las HRU se activa en la extensión ArcSWAT una vez se ha realizado la delimitación de la cuenca.

Al seleccionar el menú “HRU Analysis”, se activa un submenú denominado “Land Use/Soils/Slope Definition” que contiene tres pestañas: “Land Use Data”, “Soil Data”, y “Slope” (ver Figura 9). En la pestaña “Land Use Data” se ingresó el mapa tipo GRID de uso de tierras (lulc) y la tabla *look up* (lulct.dbf) que cumple la función de relacionar los códigos o identificadores de uso del suelo del mapa con los usos existentes en la base de datos de uso y cobertura del suelo de SWAT. La opción “Reclassify” activa el proceso de reclasificación de los campos del mapa para que sean aceptados por el modelo. En la pestaña “Soil Data” se hizo un proceso similar pero para el caso del GRID se suelos (soil) y la tabla *look up* (soilt.dbf). Para el caso de la pestaña “Slope”, como se ve en la Figura 9 (derecha), se establecieron cinco rangos de pendientes que buscan separar por clases los tipos de pendientes que existen en la cuenca del Tona. Se consideró que cinco rangos o clases (máximo número permitido por el software) eran adecuados debido a la topografía de la cuenca (rango de elevaciones entre 800 a 3898 msnm). Para este caso, también se tuvo que seleccionar la acción “Reclassify” para que el modelo adquiriera estas nuevas categorías de pendientes.

Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT.

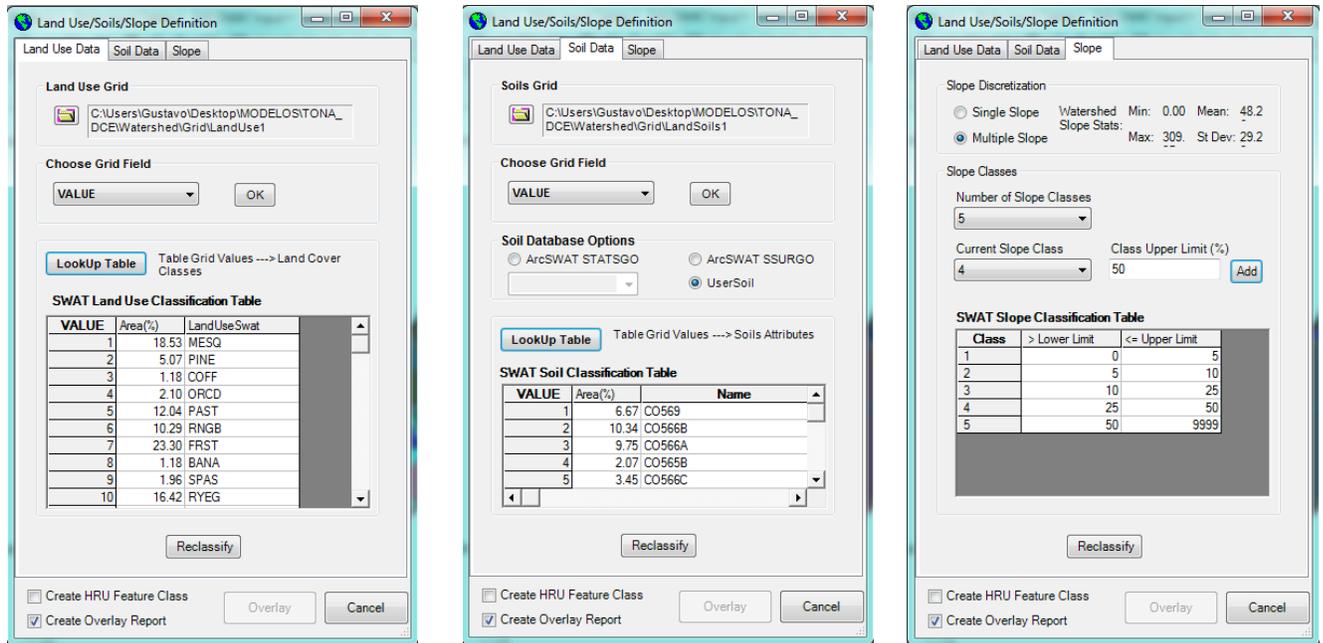
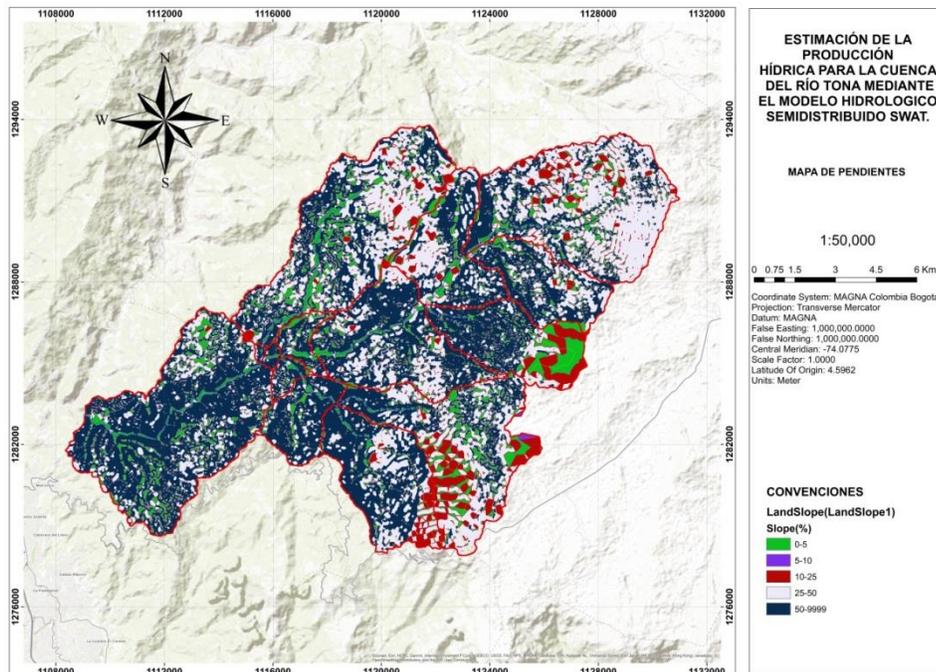


Figura 9. Ventana Land Use data – Soils Data – Slope con sus tres submenús.

La definición de las clases para las pendientes generó un nuevo GRID de pendientes (ver Mapa 8). Este GRID, junto con los de uso del suelo y suelo, fueron los insumos para la creación de las HRU.



Mapa 8. Mapa de pendientes agrupadas por clases.

Cargados los datos anteriores, dentro del menú “HRU Análisis” se activó el submenú “HRU Definition”. Este submenú activó una ventana donde se pudo establecer información específica de las HRU y su creación (ver Figura 10). En la primera pestaña (“HRU Thresholds”, izquierda en la Figura) se definió el número y tipo de HRU’s y los porcentajes de simplificación de las mismas. Para nuestro caso, se seleccionó crear múltiples HRU y

Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT.

una estrategia de simplificación por porcentajes de tal manera que cuando, al superponer usos de suelo, suelos y pendientes, se descartaron HRU's que tuvieron porcentajes de composición menores del especificado. Dado que este estudio se interesa por los usos del suelo, para esta categoría se definió un límite del 5% mientras que para suelos fue del 20% y para pendientes del 10%. En la segunda pestaña ("Land Use Refinement", centro en la Figura) se definió una excepción de la simplificación de HRU's para el caso del uso del suelo FESP (vegetación paramuna) dado que es una forma especial de vegetación que interesa conservar dentro de la modelación. En la tercera pestaña ("Elevation Bands", derecha en la Figura), se definió la creación de bandas de elevación para las subcuencas que tuvieran elevaciones mínimas en el dem de 1000 m. Estas bandas permiten corregir los valores de temperatura y precipitación reportados en las estaciones climatológicas por efectos de elevación [9].

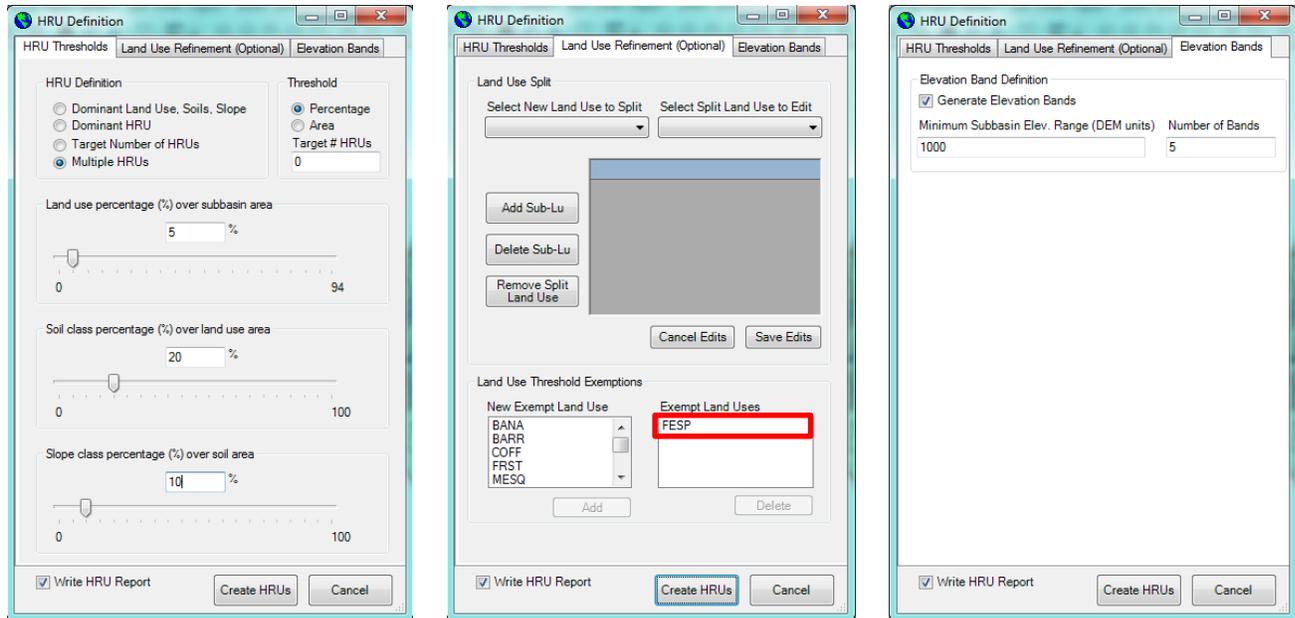


Figura 10 .Definición de unidades de respuesta hidrológica HRU.

Una vez finalizado el proceso de configuración de las HRU, el modelo generó 183 unidades. Este es un valor mucho menor al que se hubiese obtenido sin haber realizado ningún proceso de simplificación (938 unidades). El modelo permite acceder a un reporte para las HRU creadas para cada una de las subcuencas, con información de su composición (ver Anexo 2). De acuerdo con el reporte generado, se resumen aquí características importantes de la cuenca. La *Tabla 14* muestra la distribución por áreas de cada uno de los usos del suelo para la cuenca de acuerdo con los códigos SWAT asignados. En proporción, el uso más predominante es FRST, seguido por MESQ y RYEG. Los usos menos representativos (en términos de cobertura) son BARR y URBN. Vale la pena aclarar que en la sección 4 se definió un área para la cuenca del Tona de 192.50 km². Las áreas reportadas en esta sección suman 188.95 km² dado que la modelación se realizó cerrando en la estación de monitoreo Puente Tona que está localizada un poco aguas arriba del punto de cierre de la cuenca. La *Tabla 15* muestra la distribución por áreas de los suelos de la cuenca y la *Tabla 16* muestra la distribución en área y porcentaje de las clases de pendientes. Se evidencia que en la cuenca predominan las pendientes fuertes (80.22% del área total).

Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT.

LANDUSE:	Área (ha)	%Wat.Area
Honey Mesquite --> MESQ	3501.2188	18.53
Pine --> PINE	958.2656	5.07
Coffee --> COFF	222.0625	1.18
Orchard --> ORCD	396.75	2.10
Forest-Evergreen --> FRSE	2275.2344	12.04
Range-Brush --> RNGB	1943.7813	10.29
Forest-Mixed --> FRST	4402.75	23.30
Bananas --> BANA	223.3594	1.18
Summer Pasture --> SPAS	370.125	1.96
Italian (Annual) Ryegrass --> RYEG	3102.4688	16.42
Paramuna Vegetation --> FESP	461.4375	2.44
Residential --> URBN	9.9531	0.05
Southwestern US (Arid) Range --> SWRN	1025.9688	5.43
Barren --> BARR	1.9219	0.01
TOTAL	18895.30	100

Tabla 14. Áreas por uso de tierras.

SOILS	Área (ha)	%Wat.Area
CO561A	1788.6875	9.47
CO561B	1008.6563	5.34
CO562	966.50	5.12
CO563	1135.0469	6.01
CO564	1184.8125	6.27
CO565A	1668.8438	8.83
CO565B	391.6875	2.07
CO566A	1841.4063	9.75
CO566B	1953.0625	10.34
CO566C	652.3438	3.45
CO567A	1913.5625	10.13
CO567B	1020.3125	5.40
CO568	2110.1094	11.17
CO569	1260.2656	6.67

Tabla 15. Áreas por tipo de suelo.

SLOPE	Área (ha)	%Wat.Area
0-5	1791.2188	9.48
5-10	295.1094	1.56
10-25	1651.1406	8.74
25-50	6634.0313	35.11
50-9999	8523.7969	45.11

Tabla 16. Áreas por tipo de pendiente.

La *Tabla 17* muestra el punto medio de elevación para las bandas asignadas a subcuencas donde las elevaciones son mayores a 1000 msnm.

Subcuencas	ELEVB1	ELEVB2	ELEVB3	ELEVB4	ELEVB5
1	2356.57	2725.81	2974.45	3220.95	3540.26
2	2232.90	2561.05	2839.08	3071.06	3244.14
3	1896.82	2115.24	2278.77	2423.11	2565.62
4	2107.07	2672.06	3086.63	3339.48	3386.57
5	1712.04	1913.05	2082.61	2273.97	2494.51
6	1589.09	1797.77	1976.33	2206.81	2567.30
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12	2187.98	2805.99	3033.90	3218.92	3359.62
13	1075.28	1307.25	1499.73	1671.63	1871.57
14	1923.25	2208.28	2462.28	2767.90	3123.57

Tabla 17. Bandas de elevación.

5.2.3. Datos climatológicos

Los datos climatológicos se ingresaron al software en el menú “Write Input Tables”, submenú “Weather Stations”. Una vez activada la función, se desplegó una ventana con seis pestañas donde se encuentran todos los datos que requiere el modelo hidrológico en cuanto a climatología como se puede ver en la *Figura 11*.

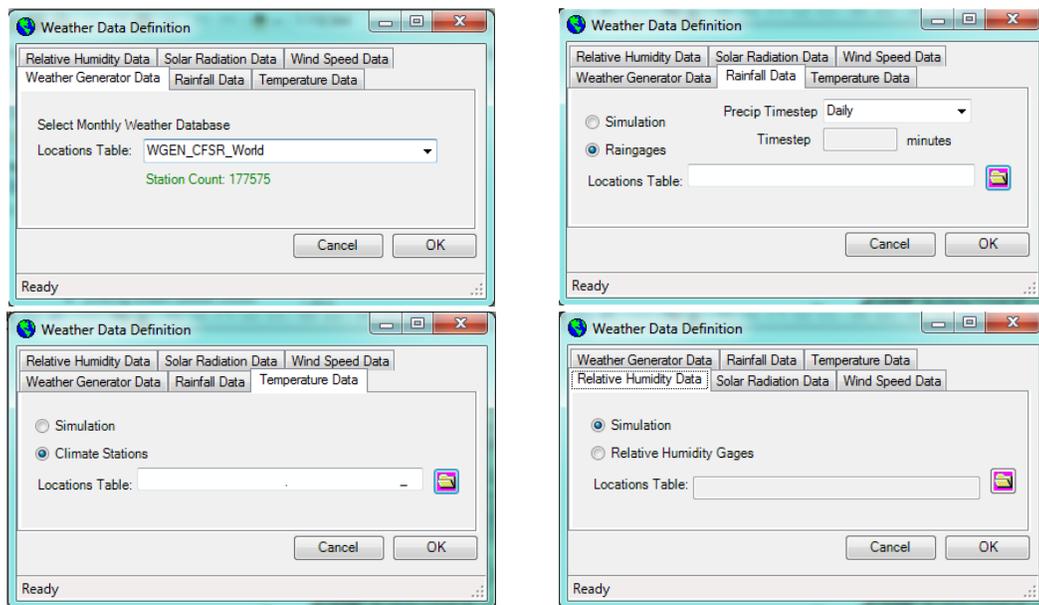


Figura 11. Ventanas para el ingreso de datos climatológicos.

5.2.3.1. Weather Generator Data: En este submenú se ingresó una base de datos de estaciones climatológicas para todo el mundo (WGEN_CFSR_World) que se usa para para la generación de datos climatológicos cuando no se cuenta con datos observados. Para nuestro caso esta base de datos sirvió para simular datos de humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento.

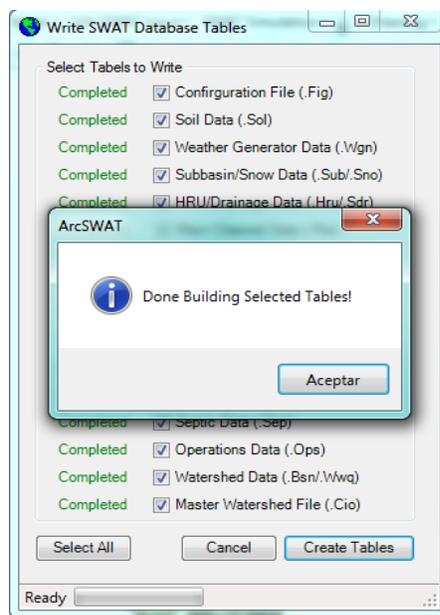
5.2.3.2. Rainfall Data: En esta pestaña se cargó el archivo de la tabla de localización de las estaciones de precipitación (pcptona.txt). En conexión con lo presentado en las secciones 5.1.4 y 5.1.5, dentro de la carpeta del proyecto de ArcSWAT deben ubicarse la tabla de datos de localización de las estaciones y los archivos de series de tiempo de las estaciones. Los nombres de estos archivos deben corresponder con los nombres de las estaciones en la tabla de localización geográfica de las mismas.

5.2.3.3. Temperature Data: En esta pestaña se cargó el archivo de la tabla de localización de las estaciones de temperatura (tmptona.txt). La aclaración de la sección anterior aplica para esta sección.

5.2.3.4. Relative Humidity Data, Solar Radiation Data and Wind Speed Data: Los datos de humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento fueron generados por el simulador de clima a partir de la base de datos global (WGEN_CFSR_World).

5.2.4. Creación de tablas.

Las tablas del modelo se crearon activando el submenú “Write SWAT Input Tables” que está localizado en el menú “Write Input Tables” de la interface de ArcSWAT. La ventana con título “Write SWAT Database Tables” permitió generar todas las tablas requeridas para la corrida del modelo (ver *Figura 12*).



*Figura 12 .Creación de tablas
Fuente: ArcSWAT.*

5.2.5. Edición de tablas de entrada

Antes de correr el modelo por primera vez, se realizaron algunos cambios de los parámetros del modelo con el fin de acercarlos más a la realidad de la cuenca del Tona. Estos cambios se efectuaron en la pestaña “Edit SWAT Input” del software.

- **Método para el cálculo de la evapotranspiración potencial (PET).** El análisis de la información disponible y estimativos realizados con la herramienta SWAT Check permitieron identificar el método Hargreaves como

Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT.

el más adecuado para nuestro caso particular (los estimativos de PET obtenidos se compararon con los del Atlas Climatológico Colombiano). El método calcula PET con la siguiente ecuación:

$$\lambda E_o = 0.0023 \cdot H_o \cdot (T_{mx} - T_{mn}) \cdot 0.5 \cdot (T_{av} + 17.8)$$

Donde:

λ : calor latente de vaporización (MJ.kg⁻¹).

E_o : evapotranspiración potencial (mm/d).

H_o : radiación extraterrestre (MJ.m².d⁻¹).

T_{mx} : temperatura aérea máxima por un día dado (°C).

T_{mn} : temperatura aérea mínima por un día dado (°C).

T_{av} : temperatura aérea mala por un día dado (°C).

Este cambio se realizó siguiendo la ruta “Edit SWAT Input / Watershed Data / General Data (.BSN)” (ver Figura 13).

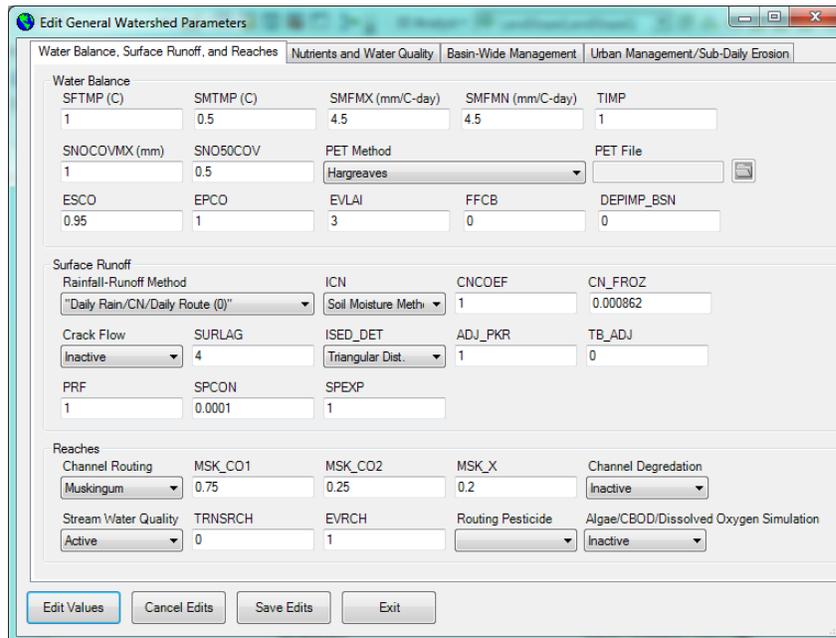


Figura 13 .Edición parámetros .BSN.

- **Información de flujo base:** Se corrió un filtro de flujo base para los caudales reportados en las estaciones Amanía, Carrizal, Golondrinas y Puente Tona. El análisis desarrollado por el filtro produjo valores específicos de los parámetros Alpha_BF y Alpha_BF_D.

La *Tabla 18* presenta los parámetros calculados por el filtro de flujo base. La primera columna muestra las subcuencas a la que aplican estos parámetros (aguas arriba del punto de medición de caudal); la segunda columna muestra el nombre del archivo usado para el análisis, que corresponde a la estación de monitoreo de caudal; la tercera columna muestra la fracción de contribución de las aguas subterráneas al caudal medido en cada una de las estaciones; la cuarta columna muestra el número de recesiones usadas para definir la curva maestra de recesión; la quinta columna muestra el valor de la constante de recesión (Alpha_BF en SWAT); la sexta columna muestra el número de días para que la recesión del flujo base decline un ciclo logarítmico; finalmente, la séptima columna muestra el parámetro Alpha_BF_D que se calcula como 1/Baseflow days.

Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT.

No Subcuenca	Estación usada para el análisis	Baseflow Fraction	NPR	Alpha factor	Baseflow days	ALPHA_BF_D
13	ptetona.prn	0.53	11	0.0966	23.8	0.042017
5,8	arnania.prn	0.81	3	0.002	1136.1	0.00088
1, 2, 3, 4, 6, 7, 9	carrizal.prn	0.69	9	0.0081	285.5	0.003503
10, 11, 12, 14	golondrinas.prn	0.71	9	0.0369	62.3	0.016051

Tabla 18. Parámetros relacionados con el flujo base.

Una vez obtenidos estos parámetros para las aguas subterráneas, se modificaron en la ventana “Edit Groundwater Parameters” que se activa siguiendo la ruta “Edit SWAT Input / Subbasins data / Groundwater.Gw”. Los parámetros Alpha_BF y Alpha_BF_D, se modificaron para las subcuencas especificadas en la *Tabla 18* para todos los tipos de uso del suelo, suelos y pendientes. La *Figura 14* muestra la localización de estos parámetros dentro de la ventana de edición de los parámetros de aguas subterráneas. Los otros parámetros se dejaron con sus valores por defecto.

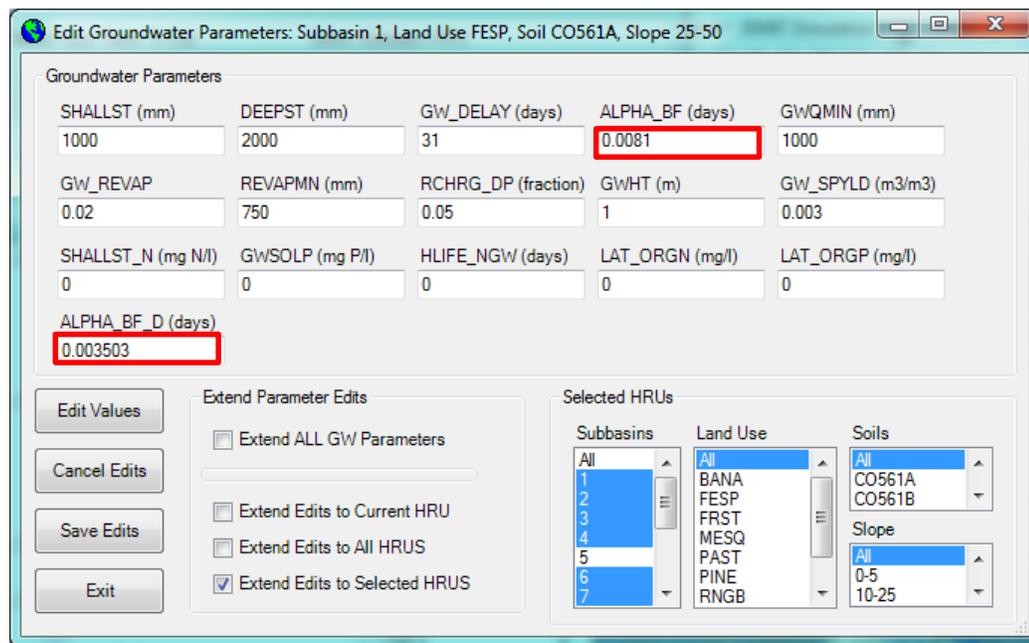


Figura 14. Ventana de edición de parámetros de aguas subterráneas (.gw).

- Edición de parámetros de subcuencas: A nivel de subcuencas se modificó el parámetro de corrección de la temperatura por cambios en elevación (TLAPS). El valor ingresado fue -6 °C/km. Este cambio se aplicó para todas las subcuencas (ver Figura 15). El valor ingresado indica que las temperaturas asignadas por las estaciones climatológicas se corrigen a una tasa de -6 °C por cada aumento de un kilómetro en elevación. En la figura también se pueden apreciar los valores de elevación media para las bandas creadas en el proceso de creación de las HRU (ver sección 5.2.2). La ventana de edición de parámetros de subcuencas se activa siguiendo la ruta “Edit SWAT Input / Subbasins data / Subbasin.Sub”

Una vez finalizadas todas las modificaciones realizadas al modelo, fue necesario reescribir las tablas. Esto se logra siguiendo la ruta “Edit SWAT Input / Rewrite SWAT Input Files”.

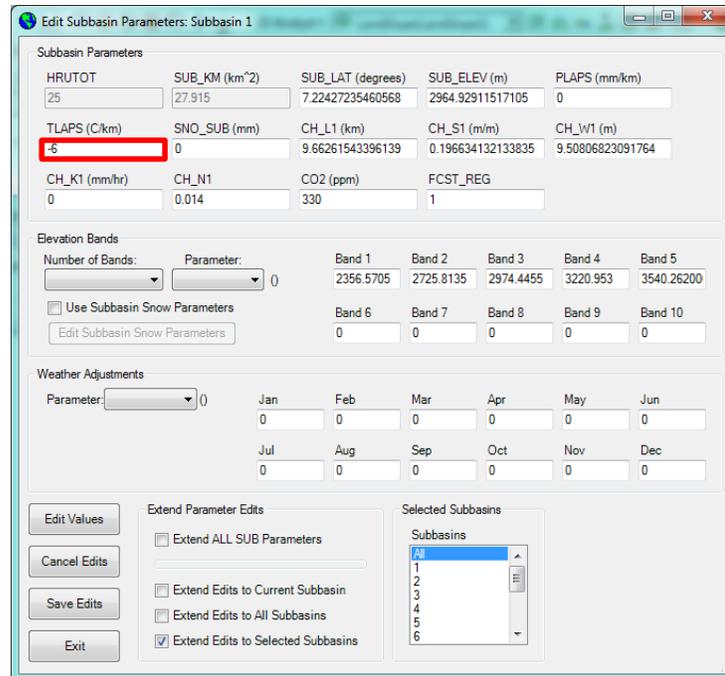


Figura 15. Edición de parámetros para las subcuencas.

5.2.6. Primera corrida del modelo

El modelo se corrió con los datos de entrada mostrados en las secciones anteriores, para el periodo (1987-2002), con el plan de acción definido en la *Tabla 19*. De los 16 años con datos disponibles de precipitación y temperatura, 11 años se dedicaron a la calibración y 5 años a la validación del modelo. Para cada uno de los procesos fue necesario reservar un período de calentamiento del modelo (3 años para calibración y 1 año para validación)

Parámetro	Datos observados (16 años)	
	Calibración	Validación
Período simulación	1987-1997 (11años)	1998-2002 (5años)
Tiempo calentamiento NYSKIP	1987-1989 (3años)	1998 (1año)
Período útil	1990-1997 (8años)	1999-2002 (4años)
Datos de salida	Monthly	Monthly
SWAT exe Versión	64-bit release	64-bit release

Tabla 19. Datos de simulación.

El menú "SWAT Simulation" permite activar la opción "Run SWAT". La *Figura 16* muestra la configuración del submenú "Setup and Run SWAT Model Simulation". La opción "Rainfall Sub-Daily Timestep" aparece inactiva ya que se ingresaron datos diarios al modelo. No se seleccionó "Set CPU Affinity" ya que esto es sugerido para cuando se requiere hacer modelaciones de gran tamaño (no fue nuestro caso). En este submenú se definió el periodo de simulación de 1987 a 1997, una salida mensual de los datos modelados y un periodo de calentamiento de 3 años. Al presionar el botón "Setup SWAT Run" se configuran los datos de la corrida del modelo. Finalmente, al seleccionar la opción "Run SWAT" se abre una ventana de DOS en la cual se puede ver el proceso de modelación para cada uno de los años definidos.

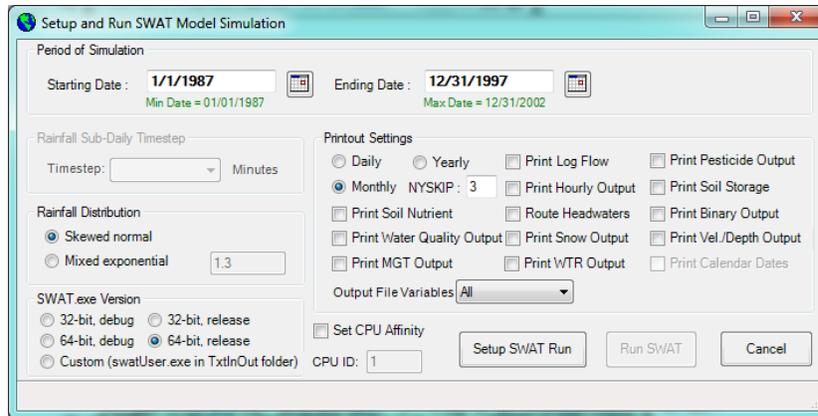


Figura 16. Configuración de la corrida del modelo para periodo de calibración.

5.2.6.1. Tablas de salida del modelo

Ejecutado el modelo, se generaron los archivos de salida en una carpeta denominada "TxtInOut". Esta carpeta contiene archivos que almacenan resultados a nivel de cuenca, subcuenca y HRU. Fue necesario estudiar esta distribución de archivos de tal manera que se pudiera identificar la localización de toda la información. Para cada subcuenca se producen 5 archivos (RTE, SUB, SWQ, WGN, WUS); para cada HRU dentro de una subcuenca, se producen 6 archivos (GW, HRU, MGT, SDR, SEP, Storm and Sanitary Analysis Solution File); para la cuenca se producen una serie de archivos que contienen información específica de la cuenca y resúmenes de las diferentes propiedades y resultados de las cuencas y las HRU.

La ruta "SWAT SIMULATION / Read SWAT Output" permitió seleccionar los archivos que se querían importar a la base de datos de ArcSWAT ("Import Files to Database"). En esta ventana (ver Figura 17) fue posible también hacer una revisión inicial de los datos del balance hídrico de la cuenca (botón "Open output.std"), guardar una copia de la simulación ("Save Simulation"), y correr la herramienta SWAT Check ("Run SwatCheck").

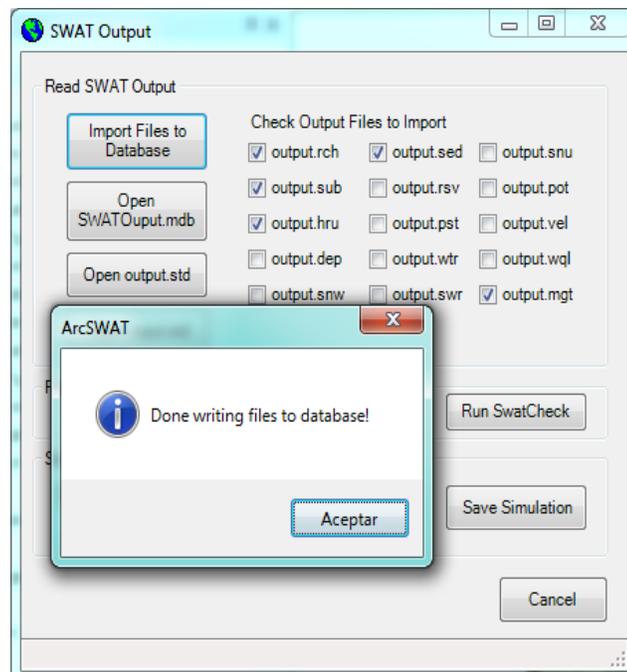


Figura 17. Tabla de salida del modelo.

5.2.6.2. SWAT Check

Con SWAT Check el programa permitió realizar un análisis de los resultados del modelo sugiriendo posibles problemas en los datos obtenidos. El insumo principal para correr SWAT Check es la carpeta "TxtInOut" de SWAT que contiene todos los archivos de salida de la modelación en diferentes formatos. Entre los análisis generales que hace SWAT está el cálculo de las siguientes relaciones:

$$\text{Total flow} = Q_{\text{surf}} + Q_{\text{lat}} + Q_{\text{gw}} = \text{flujo de retorno al afluente}$$

$$\text{Baseflow} = Q_{\text{lat}} + Q_{\text{gw}}$$

$$\text{"Streamflow/Precip"}: \frac{\text{Streamflow}}{\text{Precipitation}} = \frac{\text{Total flow}}{\text{Precipitation}}$$

$$\text{"Baseflow/Total Flow"}: \frac{\text{Baseflow}}{\text{Streamflow}} = \frac{Q_{\text{lat}} + Q_{\text{gw}}}{\text{Total flow}}$$

$$\text{"Surface Runoff/Total Flow"}: \frac{\text{Surface Runoff}}{\text{Streamflow}} = \frac{Q_{\text{surf}}}{\text{Total flow}}$$

$$\text{"Perc/Precip"}: \frac{\text{Percolation}}{\text{Precipitation}}$$

$$\text{"Deep Recharge/Precip"}: \frac{\text{Deep Recharge}}{\text{Precipitation}}$$

$$\text{"ET/Precipitation"}: \frac{\text{ET}}{\text{Precipitation}}$$

5.2.7. Modelo conceptual de entradas y salidas de SWAT

El procedimiento metodológico planteado anteriormente en el numeral 5.2 del presente estudio se resume mediante la *Figura 18*.

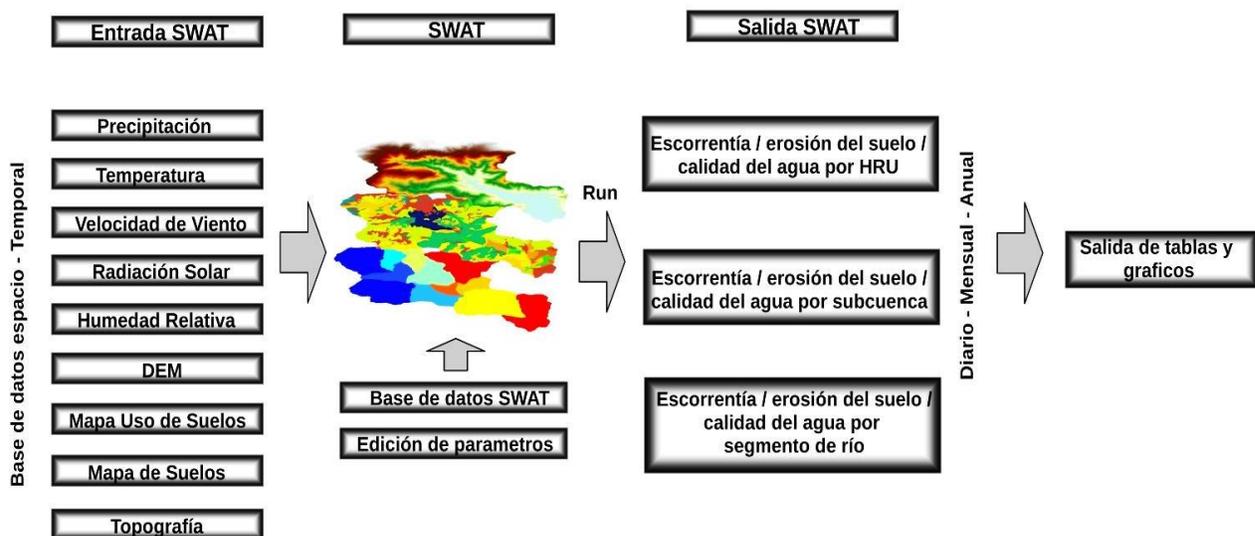


Figura 18 . Proceso general del modelo SWAT: parámetros de entrada y salida.
Fuente: adaptada por el autor a partir de Kim et al., 2012 [38].

5.3. Etapa III: Calibración y validación del modelo

Teniendo en cuenta que el modelo SWAT tiene un gran número de parámetros, fue necesario consultar diferentes referencias bibliográficas nacionales e internacionales para identificar los parámetros típicos que contribuyen significativamente al proceso de calibración. Los parámetros identificados como típicos se muestran en la *Tabla 20*.

Parámetro SWAT	Nombre
CN2	SCS runoff curve number
ALPHA_BF	Baseflow alpha factor (days)
GW_DELAY	Groundwater delay (days)
GWQMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur (mm)
GW_REVAP	Groundwater revap coefficient
REVAPMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer for revap to occur (mm)
RCHRG_DP	Deep aquifer percolation fraction
SOL_Z	Depth from soil surface to bottom of layer
SOL_BD	Moist bulk density
SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer
SOL_K	Saturated hydraulic conductivity
CH_N2	Manning's n value for the main channel
SLSUBBSN	Average slope length
OV_N	Manning's n value for overland flow
SLSOIL	Slope length for lateral subsurface flow
ESCO	Soil evaporation compensation factor
EPCO	Plant uptake compensation factor
CH_N1	Manning's n value for the tributary channels
SURLAG	Surface runoff lag time
SHALLST	Initial depth of water in the shallow aquifer (mm)
TLAPS	Temperature lapse rate
PLAPS	Precipitation lapse rate
GW_SPYLD	Specific yield of the shallow aquifer (m3/m3)

Tabla 20. Parámetros iniciales para la calibración del modelo hidrológico en SWAT.

Para cada uno de los parámetros, el modelo tiene asignado un valor por defecto o a partir de la edición de las tablas (como se describió en la sección 5.2.5). La estrategia de calibración buscó modificar los valores de dichos parámetros de tal manera que la comparación entre el caudal observado y modelado fuera la mínima posible de acuerdo a unos estadísticos. De la misma manera, la validación buscó que, para un periodo fuera del periodo de calibración, el modelo produjera datos modelados que fueran comparables con los datos de caudal observados.

Dado el número de parámetros identificados como potencialmente importantes para la calibración era extenso, se usó el software SWAT-CUP, una herramienta desarrollada por (Karim C. Abbaspour), que permite realizar calibración estocástica del modelo hidrológico a partir de los resultados almacenados en la carpeta "TxtInOut". La manera como SWAT-CUP trabaja es corriendo un gran número de simulaciones (mayor a 500) haciendo una combinación aleatoria de valores de los parámetros seleccionados dado que para cada parámetro no existe un valor único sino un rango de valores definidos por el usuario. Estos rangos deben ser cuidadosamente seleccionados y asignados para que tengan un sentido físico.

Los rangos se establecieron con base en una tabla proporcionada por la herramienta SWAT-CUP que define los rangos físicamente posibles, es decir, los valores mínimos y máximos para cada uno de los parámetros usados en SWAT (Archivo "Absolute_SWAT_Values"). La creación de los rangos de los parámetros se realizó haciendo

cambios absolutos a los valores de los parámetros ($v_{_}$) o cambios relativos a los mismos ($r_{_}$). Siguiendo las sugerencias del manual de usuario y de los foros de usuarios de la herramienta, se aplicaron cambios relativos cuando los parámetros correspondían a propiedades físicas y con referencia espacial como son los casos de los parámetros curva número (CN2), la profundidad de los diferentes horizontes de suelo (SOL_Z) o la conductividad hidráulica del suelo (SOL_K).

Para medir la eficiencia de la calibración, SWAT CUP reporta dos indicadores que son el factor r (r-factor) y el factor p (p-factor). Para explicarlos, primero hay que anotar que el resultado de la calibración en SWAT-CUP no es un único valor para los parámetros sino una familia de valores cuyos resultados, a partir de las simulaciones realizadas, ofrecen resultados de caudal modelado que se presentan como una banda de predicción del 95% (95PPU - el modelo descarta el 5% de las peores simulaciones). El factor p (p-factor) se refiere al porcentaje de los datos de caudal medidos que se encuentran dentro del rango del 95PPU. El p-factor debe tender a 1, caso para el que el 100% de los caudales observados estarían dentro de la banda 95PPU. El factor r (r-factor) se refiere al grosor de la banda 95PPU. El r-factor debe tender a ser un número pequeño (banda de grosor pequeño), idealmente cercano a 1 o menor. Como función objetivo se consideraron los coeficientes Nash-Sutcliffe (NS), PBIAS y R^2 . Los valores óptimos para estos indicadores se presentaron en la sección 3.7.

El proceso de calibración con SWAT-CUP inició con una estrategia regional, es decir, calibrando primero las partes altas de la cuenca, aprovechando que se contaba con caudales observados en los puntos de monitoreo Armania, Carrizal y Golondrinas, y finalizar con la calibración en el punto Puente Tona. Se realizaron un sinnúmero de iteraciones, cada una con 500-1000 simulaciones, en un esfuerzo por obtener valores aceptables para p-factor y r-factor. Sin embargo, esto no fue posible. Se tuvo entonces una conversación con los funcionarios del amb, quienes informaron que era posible que los datos de caudal observado para las estaciones de la parte alta no fueran muy acertados pues solo hasta el 2011 se iniciaron esfuerzos por tecnificar el proceso de monitoreo de caudales en la cuenca.

Ante esta situación, se reinició con un proceso de calibración global de la cuenca, teniendo como punto de referencia la estación Puente Tona. Vale la pena aclarar que, aunque estos caudales fueron medidos con más certidumbre, tienen un nivel de incertidumbre importante asociado a los caudales extraídos en las bocatomas de Armania, Carrizal y Golondrinas (el amb solo cuenta actualmente con datos exactos de estas extracciones a partir del año 2003). Ante esta situación, se decidió agregar un valor promedio de caudal extraído de $1.26 \text{ m}^3/\text{s}$ a los valores observados en la estación Puente Tona, para obtener un estimativo de caudal sin extracciones para la cuenca y así poder comparar los valores de caudal modelados con los observados. Los resultados de esta calibración se muestran en la sección 6.2.

Dado que los resultados de la calibración automática global con SWAT-CUP no fueron óptimos (ver resultados en la sección 6.2), se decidió tratar de mejorar los resultados mediante una calibración manual basada en los parámetros y rangos obtenidos hasta este punto. La calibración manual consistió en cambiar valores de los parámetros uno por uno dentro de ArcSWAT usando la herramienta "Manual Calibration" que se activa en la ruta "SWAT Simulation / Manual Calibration Helper". En este caso no se obtuvieron valores de p-factor ni r-factor, así que la evaluación de resultados se enfocó en la evaluación de los estadísticos Nash-Sutcliffe (NS), PBIAS y R^2 . El proceso de calibración manual logró mejorar los resultados de la calibración (ver sección 6.3), Aunque no ofreció resultados de validación satisfactorios.

5.4. Etapa IV: Corrida del modelo para escenarios modificados

Finalizada la etapa III (calibración y validación), se procedió a crear diferentes escenarios en el modelo de tal manera que se obtuvieran resultados de producción hídrica para posibles cambios en el uso del suelo y clima. A continuación, se presentan los cambios propuestos.

5.4.1. Escenarios de uso y cobertura del suelo

El POAT propone tres escenarios: tendencial (se mantiene la tendencia de la cobertura presente), orientado a la protección y concertado (se combinan actividades protectoras y productoras). Simular estos tres escenarios era complicado operativamente pues SWAT solo permite hacer cambios entre usos del suelo que ya existen en la subcuenca. Por tal motivo, se propuso correr el modelo para los siguientes escenarios de uso del suelo:

- Escenario A: Uso del suelo actual (el que se ingresó al modelo)
- Escenario B: Cambios en el uso del suelo al 50% y al 100% entre las categorías presentadas en la *Tabla 21*. Estos cambios representan una condición de transición natural a rastrojos (MESQ) y cambios a cultivos permanentes (COFF), potreros arbolados (RNGB), y algunos bosques plantados.
- Escenario C: Cambios en el uso del suelo al 50% y al 100% entre las categorías presentadas en la *Tabla 22*. Estos cambios representan condiciones de protección más agresiva en las cuales varios de los usos cambian a bosque (FRST), rastrojos (MESQ) y potreros arbolados (RNGB)

Escenario B		
Uso Actual	Cambio Uso	Subcuencas
BANA	COFF	13
PAST	MESQ	1,2,3,6,13
PAST	PINE	5
RNGB	MESQ	1,5,12,13
RYEG	COFF	13
RYEG	MESQ	2,3,5,6,7
RYEG	RNGB	8,9,10,11,12,14
SPAS	MESQ	12,14
SWRN	MESQ	3,4,6

Tabla 21. Cambios de uso del suelo – Escenario B.
Fuente: Proyecto de Investigación 086-0117-2300.

Escenario C		
Uso Actual	Cambio Uso	Subcuencas
BANA	FRST	13
PAST	FRST	1,2,6,13
RNGB	FRST	1,5,12,13
RYEG	FRST	2,3,5,6,11,12,13,14
RYEG	MESQ	7
RYEG	RNGB	8
SPAS	FRST	12
SWRN	FRST	3,4,6

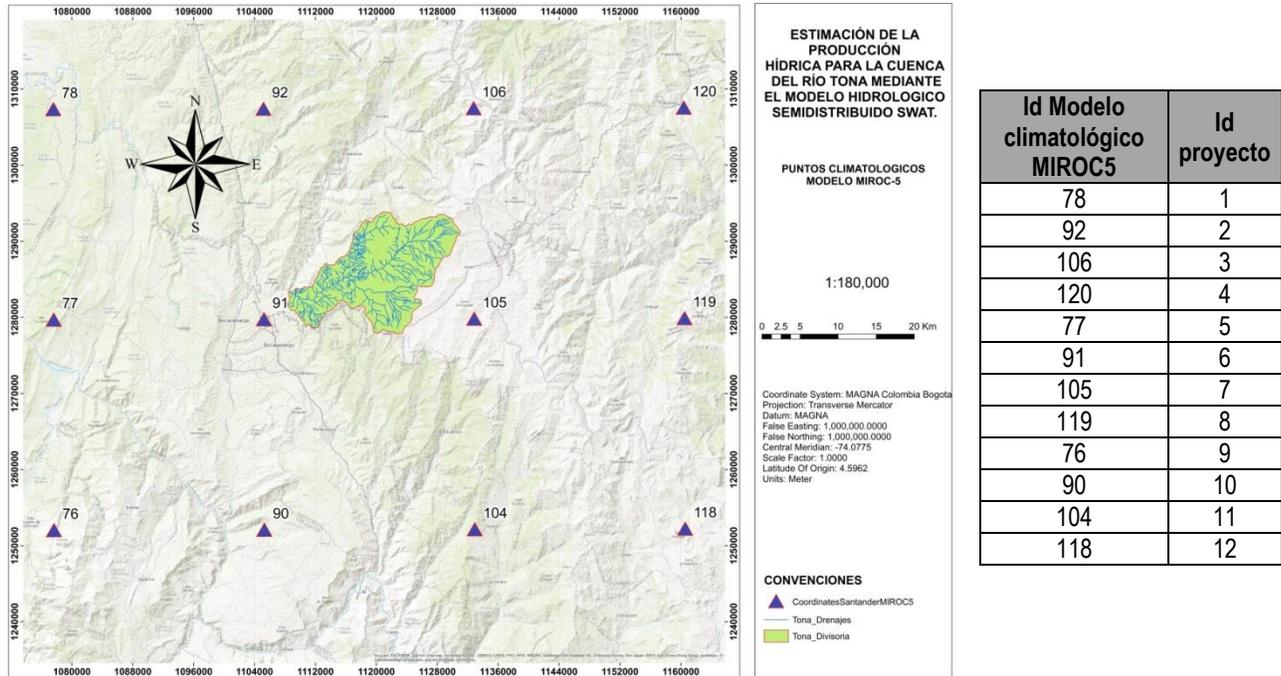
Tabla 22. Cambios de uso del suelo – Escenario C.
Fuente: Proyecto de Investigación 086-0117-2300.

5.4.2. Escenarios de clima

Los escenarios de clima futuro (precipitación y temperatura para el período 2006-2050) se tomaron del análisis realizado por los estudiantes Angie Daniela Rodríguez Buitrago y Diego Fernando Gómez Estupiñán, titulado “Aplicabilidad de datos climatológicos escalados para la modelación hidrológica de la cuenca del río Tona en Santander” [39]. La evaluación hecha por los estudiantes identificó que el modelo MIROC5 puede ser usado para modelar escenarios futuros en Colombia. Por disponibilidad de información, se usaron datos diarios escalados del modelo para los escenarios de forzamiento radiativo RCP 4.5 y 8.5, donde el escenario RCP 4.5 representa condiciones de clima asociadas a una tendencia estable de emisión de gases de efecto invernadero mientras que el 8.5 representa condiciones de clima asociadas a un aumento rápido de emisiones de gases de efecto invernadero (escenario más desfavorable).

Se ingresaron a SWAT series de tiempo (período 2006-2050) para 12 puntos que están localizados alrededor de la cuenca de interés. El *Mapa 9* muestra la localización geográfica de los mismos con respecto al área de estudio. La tabla a la derecha del mapa muestra la equivalencia entre los números de los puntos en el mapa y los códigos de identificación de los puntos para el proyecto.

Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT.



Mapa 9. Mapa de localización de los puntos con datos escalados de clima futuro
 Fuente: Autor

La *Tabla 23* muestra la localización geográfica de cada uno de los 12 puntos. En este caso, en términos de las entradas al modelo, hubo igual número de estaciones con datos de precipitación y temperatura.

ID	Precipitation	Temperature	LAT	LONG	ELEVATION
1	1_7.3750_286.6250_PCP	1_7.3750_286.6250_TMP	7.375	-73.375	136
2	2_7.3750_286.8750_PCP	2_7.3750_286.8750_TMP	7.375	-73.125	1500
3	3_7.3750_287.1250_PCP	3_7.3750_287.1250_TMP	7.375	-72.875	3500
4	4_7.3750_287.3750_PCP	4_7.3750_287.3750_TMP	7.375	-72.625	2350
5	5_7.1250_286.6250_PCP	5_7.1250_286.6250_TMP	7.125	-73.375	990
6	6_7.1250_286.8750_PCP	6_7.1250_286.8750_TMP	7.125	-73.125	970
7	7_7.1250_287.1250_PCP	7_7.1250_287.1250_TMP	7.125	-72.875	3450
8	8_7.1250_287.3750_PCP	8_7.1250_287.3750_TMP	7.125	-72.625	3500
9	9_6.8750_286.6250_PCP	9_6.8750_286.6250_TMP	6.875	-73.375	1478
10	10_6.8750_286.8750_PCP	10_6.8750_286.8750_TMP	6.875	-73.125	1050
11	11_6.8750_287.1250_PCP	11_6.8750_287.1250_TMP	6.875	-72.875	2850
12	12_6.8750_287.3750_PCP	12_6.8750_287.3750_TMP	6.875	-72.625	3460

Tabla 23. Coordenadas geográficas de puntos con datos escalados de clima futuro.
 Fuente: Proyecto de Investigación 086-0117-2300.

La *Tabla 24* presenta la estrategia de subdivisión de los datos climatológicos disponibles para correr el modelo en los diferentes escenarios. Para los 45 años de datos disponibles (2006-2050), 4 años se dedicaron al calentamiento del modelo (2006-2009) y 41 años se dedicaron a la corrida del mismo (2010-2050).

Parámetro	Datos modelo climatológico (45 años)
Periodo simulación	2006-2050 (45años)
Tiempo calentamiento NYSKIP	2006-2009 (4años)
Periodo valido	2010-2050 (41años)
Datos de salida	Monthly
SWAT exe Versión	64-bit release

Tabla 24. Datos para la simulación de condiciones futuras.

La Sección 7 presenta resultados para la combinación de usos del suelo y clima futuro de la siguiente manera:

Escenario	Combinación
1	Escenario A (uso) + RCP 4.5 (clima)
2	Escenario A (uso) + RCP 8.5 (clima)
3	Escenario B (uso) + RCP 4.5 (clima)
4	Escenario B (uso) + RCP 8.5 (clima)
5	Escenario C (uso) + RCP 4.5 (clima)
6	Escenario C (uso) + RCP 8.5 (clima)

Tabla 25. Escenarios modelados para condiciones futuras.

5.5. Etapa V: Análisis de resultados

Esta última etapa consistió en analizar toda la información resultante generada por el modelo hidrológico SWAT como respuesta de la cuenca en condiciones presentes y escenarios modificados. Se analizaron los resultados a medida que se presentaron en la sección 7. Los elementos más importantes permitieron emitir conclusiones y recomendaciones del proceso de modelación y las posibilidades que tiene para el manejo de la cuenca del Tona.

6. RESULTADOS DE LA MODELACIÓN USANDO DATOS CLIMATOLÓGICOS OBSERVADOS

Esta sección presenta los resultados obtenidos para el proceso de modelación de la cuenca usando datos climatológicos observados. Se incluyen resultados de la modelación inicial, de los esfuerzos de calibración automática y finalmente, de los resultados de calibración y validación manual.

6.1. Resultados de la primera corrida del modelo

La primera corrida del modelo arrojó resultados que se analizaron con la herramienta SWAT CHECK. Como se muestra en la *Figura 19*, la primera pestaña de esta herramienta se dedica a presentar un resumen de la configuración de la modelación, y una serie de sugerencias sobre posibles errores o aspectos que se deben revisar para los componentes del modelo que se estén trabajando. Dado que este estudio se enfoca en la hidrología, interesan las sugerencias y cálculos localizados en la segunda pestaña de la interface (ver *Figura 20*).

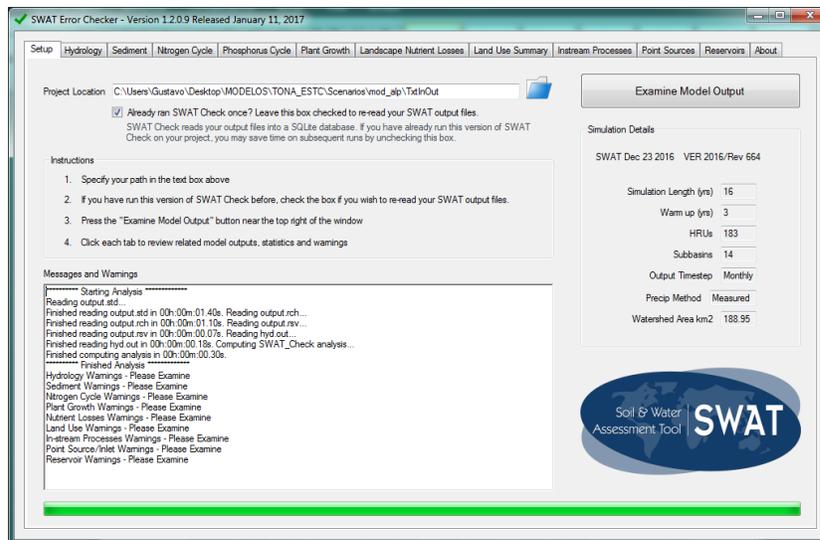


Figura 19. Resumen de la configuración de la modelación en SWAT Check.

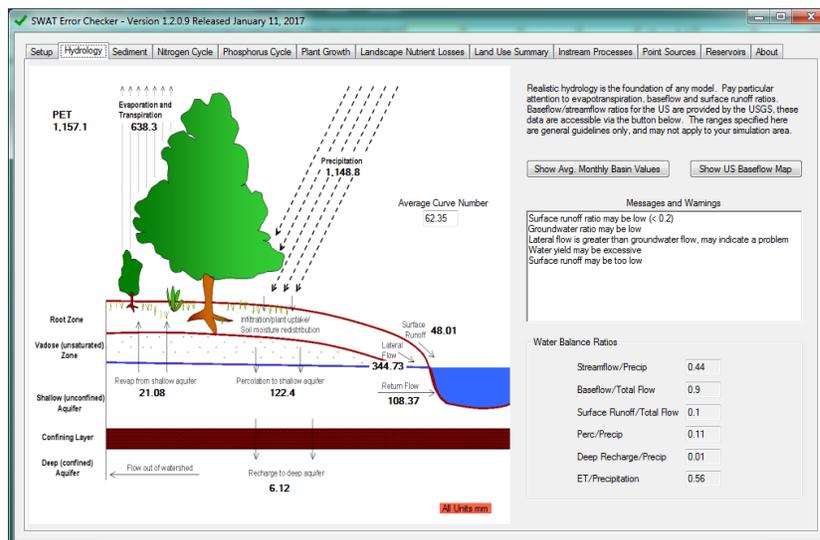


Figura 20. Ventana SWAT Check - Hidrology

6.1.1. Cálculo de relaciones entre elementos del balance hídrico.

La parte izquierda de la *Figura 20* presenta valores promedios anuales de los diferentes componentes del balance hídrico. La precipitación (Precipitation), principal entrada de agua a la cuenca hidrográfica tiene un valor promedio anual de 1148.8 mm, mientras que las pérdidas suman 644.42 mm (la suma entre evapotranspiración real y recarga al acuífero profundo).

El aporte de la cuenca al caudal (Total Flow) resulta de la suma entre el escurrimiento superficial (Surface Runoff, Q_{surf}), el flujo lateral (Lateral Flow, Q_{lat}) y el aporte de aguas subterráneas (Return Flow, Q_{gw}):

$$\text{Total flow} = Q_{surf} + Q_{lat} + Q_{gw} = 48.01 + 344.73 + 108.37 = 501.11\text{mm} \rightarrow \text{flujo de retorno al afluente}$$

La contribución al flujo total está dominada por el flujo lateral (69%), seguido del aporte de las aguas subterráneas (22%), y finalmente por el escurrimiento superficial (9%).

El flujo base de la cuenca (Baseflow) se calcula como la suma entre el flujo lateral (Lateral Flow, Q_{lat}) y el aporte de aguas subterráneas (Return Flow, Q_{gw}):

$$\text{Baseflow} = Q_{lat} + Q_{gw} = 344.73 + 108.37 = 453.10\text{mm}$$

A partir de estos valores, el modelo calcula algunas relaciones y las compara con valores sugeridos por expertos para recomendar así algunas revisiones a los resultados obtenidos en la modelación.

$$\text{"Streamflow/Precip"}: \frac{\text{Streamflow}}{\text{Precipitation}} = \frac{\text{Total flow}}{\text{Precipitation}} = \frac{501.11\text{mm}}{1148.80\text{mm}} = 0.44$$

$$\text{"Baseflow/Total Flow"}: \frac{\text{Baseflow}}{\text{Streamflow}} = \frac{Q_{lat} + Q_{gw}}{\text{Total flow}} = \frac{453.10\text{mm}}{501.11\text{mm}} = 0.90$$

El valor obtenido para la relación "Baseflow/Total Flow" es alto por lo que la calibración incluyó parámetros que buscaran reducir este valor. Sin embargo, hay que recordar que el porcentaje promedio de contribución del flujo base al caudal para la cuenca es de 69% (promedio entre los valores de Baseflow Fraction de la *Tabla 18*). Adicionalmente, es importante resaltar aquí que el trabajo desarrollado por Gómez y Gómez [40], que utilizó diferentes métodos numéricos para determinar el porcentaje de flujo base para el río Suratá (corriente a la que drena el río Tona), encontró un rango de valores entre 48.6% y 82.2%, siendo 82.2% el de mejor coeficiente de determinación ($R^2=0.873$).

$$\text{"Surface Runoff/Total Flow"}: \frac{\text{Surface Runoff}}{\text{Streamflow}} = \frac{Q_{surf}}{\text{Total flow}} = \frac{48.01\text{mm}}{501.11\text{mm}} = 0.10$$

La contribución de escurrimiento superficial al flujo total es baja (10%)

$$\text{"Perc/Precip"}: \frac{\text{Percolation}}{\text{Precipitation}} = \frac{121.45\text{mm}}{1148.80\text{mm}} = 0.11$$

$$\text{"Deep Recharge/Precip"}: \frac{\text{Deep Recharge}}{\text{Precipitation}} = \frac{6.12\text{mm}}{1148.80\text{mm}} = 0.01$$

La contribución de la cuenca al acuífero profundo puede ser baja (1%)

$$\text{"ET/Precipitation"}: \frac{\text{ET}}{\text{Precipitation}} = \frac{\text{ET}}{\text{Precipitation}} = \frac{638.30\text{mm}}{1148.80\text{mm}} = 0.56$$

Adicionalmente, el modelo sugiere que puede haber errores en la modelación dado que el aporte por flujo lateral es mayor que el aporte de aguas subterráneas al flujo total. Finalmente, el modelo sugiere considerar la evaluación de la producción hídrica (Water yield) pues puede ser muy alta. Vale la pena aclarar que estas recomendaciones son generales y no necesariamente aplican para el sitio de estudio.

6.1.2. Cálculo de la producción hídrica

La producción hídrica de la cuenca (WYLD) se calcula como la suma del caudal total (Total Flow) menos las pérdidas por transmisión y extracciones que puedan ocurrir en la cuenca. Sin embargo, el flujo de agua subterránea (Q_{gw}) se considera como el total entre flujo subterráneo en el acuífero superficial (108.37mm) y profundo (6.73mm).

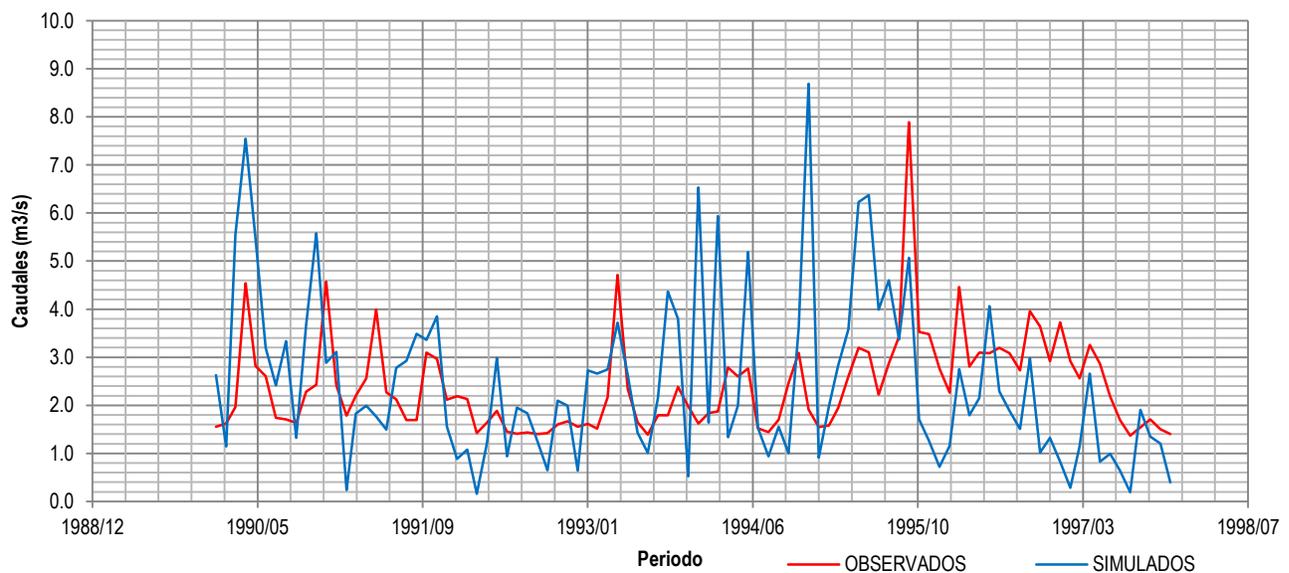
$$WYLD = Q_{surf} + Q_{lat} + Q_{gw} - TLOSS - pond\ abstractions$$

$$WYLD = 48.01 + 344.73 + (108.37 + 6.73) - 0 - 0$$
$$WYLD = 507.84\text{mm}$$

La producción hídrica para la cuenca (promedio anual) para la primera corrida del modelo es de 507.84 mm.

6.1.3. Comparación entre caudales observados y simulados para la estación Puente Tona.

Los caudales simulados para el período de modelación (1990-1997, de acuerdo con la *Tabla 19*) se encuentran localizados en el archivo "output.rch" de la carpeta "TxtInOut". Estos datos se pueden leer directamente en el archivo, mediante la base de datos de Access "SWATOutput.mdb", o usando la herramienta "SWAT Output Viewer" para SWAT [41]. La *Gráfica 2* muestra en rojo los caudales observados y en azul los caudales modelados para la estación Puente Tona para la primera corrida del modelo. Es evidente que no hay una correspondencia satisfactoria entre las dos series de tiempo. En la mayoría de los casos, los caudales simulados exceden los observados (coincidente con la observación hecha sobre posible valor alto de producción hídrica de la sección 6.1.1).



Gráfica 2. Caudales simulados vs. observados en la estación Puente Tona para la primera corrida del modelo.

Los cálculos de eficiencia (ver sección 3.7) ayudan a confirmar que la primera modelación no produjo resultados satisfactorios pero dan una base para evaluar la mejora del modelo durante el proceso de calibración. Para la primera corrida del modelo, se obtuvieron valores de $NSE=-1.96$, $PBIAS=-2.54$ y $R^2=0.09$.

$$NSE = 1 - \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{mean})^2} \right) \rightarrow NSE = 1 - \left(\frac{281.57}{95.00} \right) \rightarrow NSE \cong -1.96$$

El valor obtenido para NSE indica que el modelo no fue capaz de predecir el caudal observado. De acuerdo con la clasificación presentada en la *Tabla 3*, la modelación es insatisfactoria. Solo un valor por encima 0.50 sugeriría resultados satisfactorios para la modelación [29].

El valor negativo de PBIAS (-2.54) indica un sesgo con tendencia a la sobreestimación de los caudales simulados con respecto a los observados. Esto es evidente en la *Gráfica 2*. Sin embargo, el valor obtenido clasifica la modelación como “buena” dado que se encuentra en el rango $\pm 10 \leq PBIAS \leq \pm 15$ (ver *Tabla 3*).

$$PBIAS = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n Q_{obs}} \right) \rightarrow PBIAS = \left(\frac{-586.37}{230.67} \right) \rightarrow PBIAS \cong -2.54$$

Finalmente, el coeficiente de determinación (R^2) evidencia una correlación muy baja entre los datos simulados y observados.

$$R^2 = \left(\frac{50.38}{(95.00 * 286.95)^{0.5}} \right)^2 \rightarrow R^2 \cong 0.09$$

Los resultados obtenidos evidencian la necesidad de ejecutar un proceso de calibración que pueda ajustar los parámetros a las condiciones de la cuenca. La próxima sección muestra los resultados del proceso de calibración automática.

6.2. Calibración automática usando SWAT-CUP

El proceso de calibración automática, como se describió en la metodología (ver sección 5.3), se enfocó en una calibración global de la cuenca usando como único punto de referencia la estación Puente Tona. Se desarrollaron 6 iteraciones con 500-1000 simulaciones cada una. Aunque los resultados no fueron del todo satisfactorios, los resultados obtenidos en términos de la identificación de los parámetros más sensibles sirvieron como base para el proceso de calibración manual. La *Figura 21* muestra en color azul los valores observados de caudal promedio mensual para el período de calibración, en rojo muestra la “mejor” simulación, y en verde muestra el rango 95PPU. Es evidente que, aunque la calibración fue capaz de aproximarse a la tendencia general de los caudales observados, no fue capaz de simular los picos de caudal. El p-factor alcanzó un valor de 0.5 y el r-factor, un valor de 0.58. Estos valores no son ideales, pero podrían ser aceptables dependiendo del interés del estudio que los utilice. Para nuestro caso, se esperaba una mejor respuesta. El proceso logró mejorar los estadísticos de tal manera que $NSE=0.31$, $PBIAS=0.4$ y $R^2=0.32$.

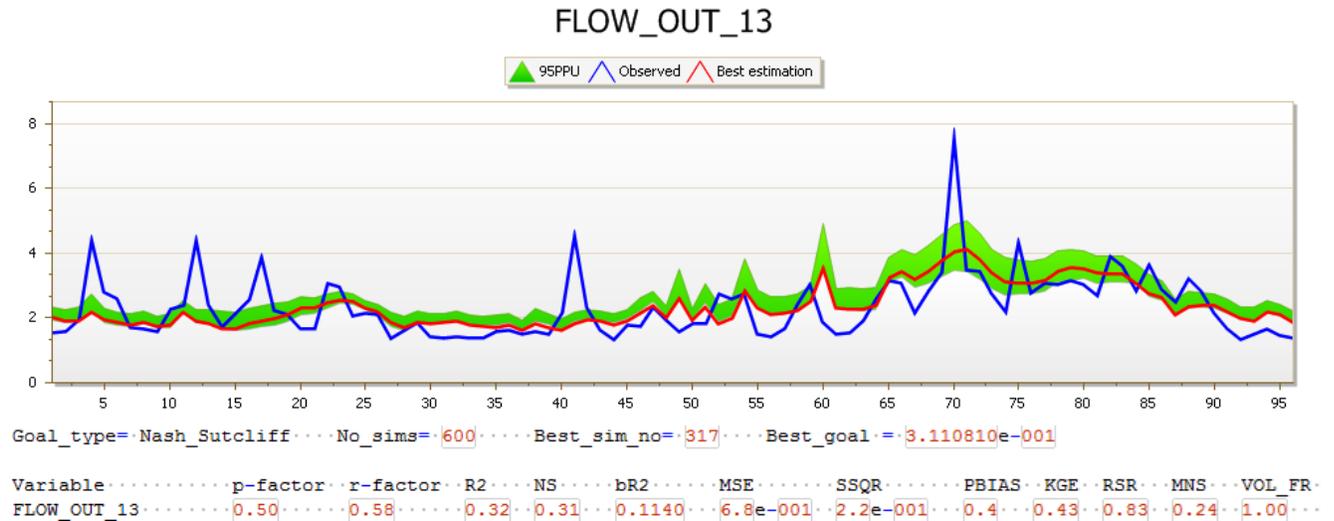


Figura 21. Resultados de la calibración automática usando SWAT-CUP.

La Figura 23 muestra el compendio final de parámetros usados en la calibración automática junto con el rango de valores definidos para crear las simulaciones, y la Figura 23 muestra los parámetros junto con los estadísticos P-Value y t-Stat. Valores pequeños de P-Value (<0.1) y grandes de t-Stat indican los parámetros más sensibles durante el proceso de calibración, es decir, cambios de dichos parámetros resultaron en cambios “importantes” en los resultados de la simulación.

r_CN2.mgt	-0.01619852	-0.110316
v_ALPHA_BF.gw	0.019005	0.026823
v_GW_DELAY.gw	166.827301	227.012939
v_GWQMN.gw	4409.600098	4843.64795
v_GW_REVAP.gw	0.12656	0.158646
v_REVAPMN.gw	298.742157	352.274078
v_RCHRG_DP.gw	0.307675	0.367913
r_SOL_Z().sol	-0.190568	0.01305988
r_SOL_BD().sol	-0.361096	0.10035209
r_SOL_AWC().sol	-0.543651	-0.422517
r_SOL_K().sol	-0.476689	0.04257188
v_CH_N2.rte	0.061254	0.097214
v_SLSUBBSN.hru	99.057419	116.57074
r_OV_N.hru	0.58151	0.827236
v_SLSOIL.hru	118.781509	139.596039
v_ESCO.hru	0.817217	0.859747
v_EPCO.hru	0.581412	0.706348
v_CH_N1.sub	0.199687	0.224569
v_SURLAG.bsn	7.199446	9.166059
v_SHALLST.gw	0	117.528557
r_TLAPS.sub	-0.961783	-0.451777
r_PLAPS.sub	0.259268	0.589612
v_GW_SPYLD.gw	0.284419	0.359789

Figura 22. Rangos aplicados para los parámetros usados en la calibración automática en SWAT-CUP – iteración final.

Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT.

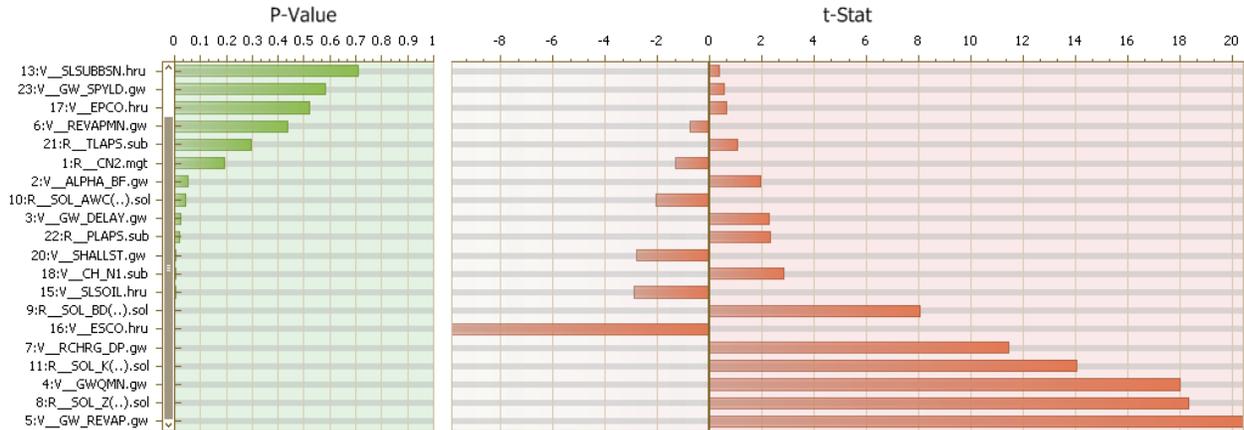


Figura 23. Parámetros más sensibles en la calibración automática con SWAT-CUP.

6.3. Calibración manual usando la interface de ArcSWAT

La calibración manual se basó en los resultados de la calibración automática en términos de los parámetros identificados como sensibles, y el rango de valores a utilizar. Sin embargo, se diferencia de ella en que la calibración manual cambia valores individualmente para los parámetros, produciendo una solución determinista (no una familia de soluciones). Al igual que para la calibración automática, los parámetros se cambiaron realizando operaciones de escalamiento (opción “Multiply by”) o de reemplazo (“Replace Value”) de los valores. La Figura 24 muestra la interface de ArcSWAT donde se realizó el proceso de calibración manual.

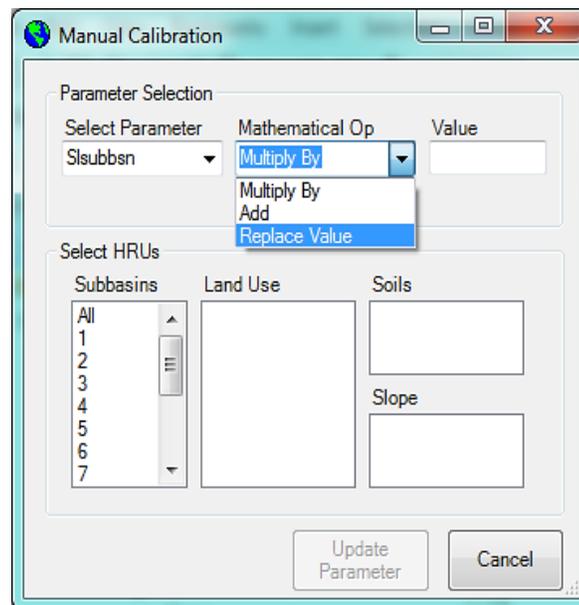


Figura 24 .Ventana para calibración manual en ArcSwat.

Se realizaron entonces, 34 simulaciones donde se fueron cambiando los valores por defecto (obtenidos en la primera simulación), en la mayoría de los casos escalándolos, siempre buscando el ajuste entre los caudales observados y los simulados. Los indicadores para evaluar el ajuste fueron los estadísticos NSE, PBIAS y R^2 . La Tabla 26 presenta los valores usados para la simulación final. La función “Replace Value” se usó únicamente para los parámetros “CANMX”. Como se puede ver en ella, se hizo un trabajo de “regionalización” de los parámetros, buscando obtener los mejores resultados para la calibración.

Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT.

PARÁMETRO	Subcuencas													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
CN2	0.75	0.75	0.75	0.75	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.64	0.60	0.64
ALPHA BF	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025	0.0025
GW_DELAY	2.58	2.58	0.16	2.58	5.16	8.06	8.06	3.87	3.87	3.87	8.06	0.32	8.06	2.58
GWQMN	1.33	1.33	1.70	1.36	1.29	1.29	1.36	1.29	1.29	1.29	1.29	2.00	1.29	2.80
GW_REVAP	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00	6.00
REVAPMN	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67	0.67
RCHRG_DP	4.60	4.60	4.60	4.60	4.60	4.60	4.60	4.60	4.60	4.60	4.60	4.60	4.60	4.60
SOL_Z	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.27	0.27	0.38	0.38	0.38	0.27	0.38
SOL_AWC	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
SOL_K	0.75	0.75	0.60	0.75	0.60	0.60	0.60	0.10	0.10	0.60	0.60	0.75	0.10	0.60
CH_N2	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
SLSUBBSN	1.10	1.10	4.20	1.10	19.60	18.20	12.32	22.40	16.80	11.76	15.40	1.40	16.80	2.80
ESCO	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63	0.63
EPCO	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
TLAPS	1/3	1/3	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6	1/6
CANMX	15.00	20.00		5.00							5.00	10.00		10.00
ALPHA BF D	0.10	0.10	0.10	0.10									0.005	

Tabla 26. Valores finales para el proceso de calibración manual en ArcSWAT.

Los estadísticos obtenidos para este proceso de calibración mejoraron de tal manera que se alcanzó un NSE=0.48, PBIAS=0.18, y R²=0.48:

$$NSE = 1 - \left(\frac{49.76}{95.00} \right) \rightarrow NSE \cong 0.48$$

$$PBIAS = \left(\frac{41.25}{230.67} \right) \rightarrow PBIAS \cong 0.18$$

$$R^2 = \left(\frac{40.21}{(95.00 * 35.17)^{0.5}} \right)^2 \rightarrow R^2 \cong 0.48$$

La calibración manual permitió reducir el rendimiento hídrico en un 2.40% así:

Q_{surf}: 10.91mm

Q_{lat}: 156.04mm

Q_{gw} acuífero superficial: 172.09mm

Q_{gw} acuífero profundo: 156.52mm

$$WYLD = Q_{surf} + Q_{lat} + Q_{gw} - TLOSS - \text{pond abstractions}$$

$$WYLD = 10.91 + 156.04 + (172.09 + 156.52) - 0 - 0 \rightarrow WYLD = 495.56\text{mm}$$

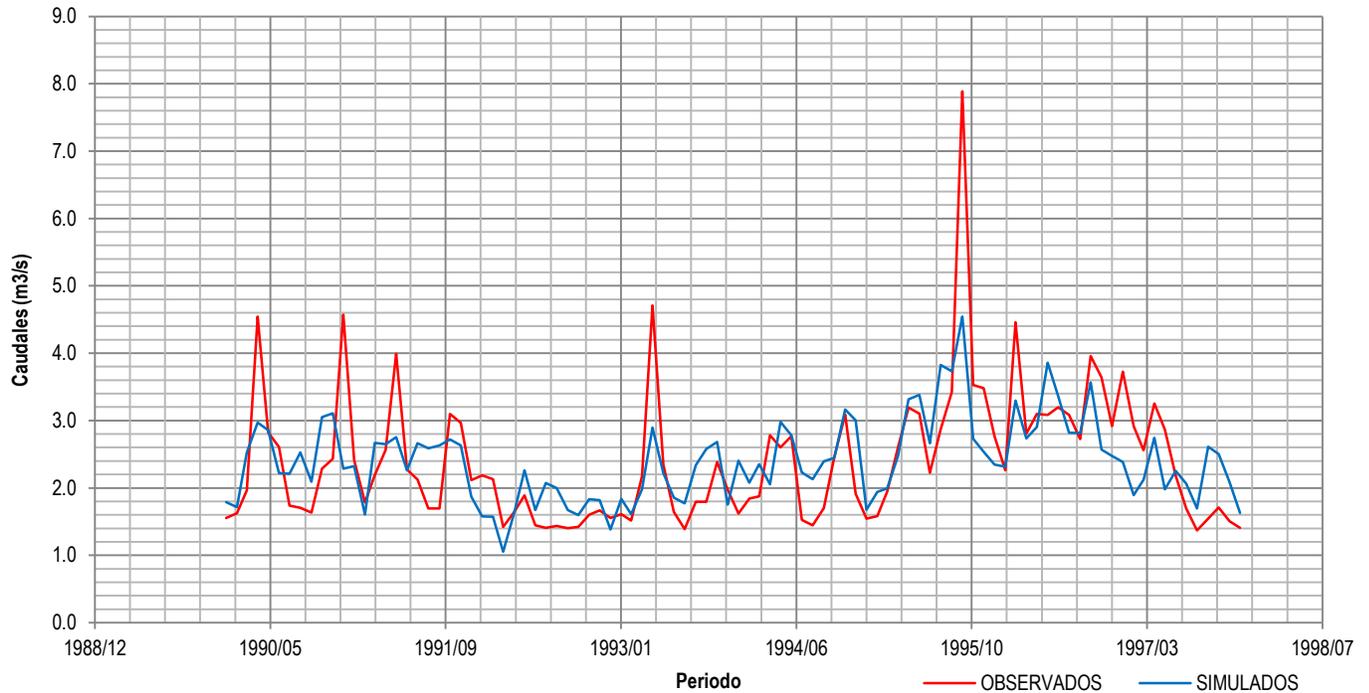
Los resultados indican cambios significativos en los elementos del balance hídrico, en comparación con la modelación inicial. Se pueden resaltar los siguientes:

- Reducción de 37.1 mm (77.3%) en el escurrimiento superficial (Q_{surf}).
- Aumento de 150 mm en la contribución al acuífero profundo (Q_{gw} acuífero profundo).
- Reducción de 125 mm (27.6%) de la contribución al flujo total del flujo base (baseflow).

Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT.

- Reducción de 162.1 mm (32.3%) mm del flujo total (Total flow).
- Incremento de 149.8 mm (22.26%) de la contribución al acuífero profundo.

El proceso de calibración manual generó la curva azul de la *Gráfica 3*. En comparación con los resultados iniciales, y como lo muestran los estadísticos, se logró una mejoría sustancial de la modelación. Sin embargo, es evidente que el mejoramiento en la calidad de los insumos al modelo hidrológico y estudios particulares que mejoren la parametrización, podrían mejorar significativamente los resultados de la calibración.



Gráfica 3. Caudales simulados vs. caudales observados para la calibración manual de la cuenca del Tona.

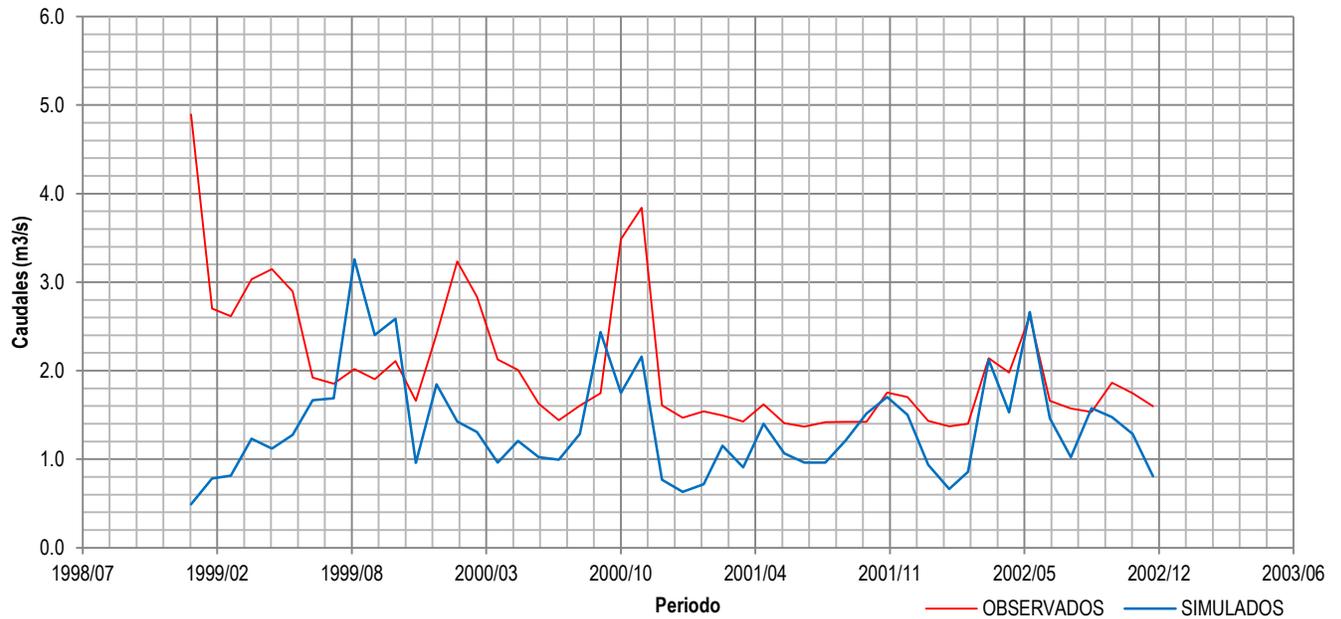
El modelo calibrado (reconociendo que puede ser mejorado) fue verificado para el período de validación que, de acuerdo con la *Tabla 19*, fue de 5 años (1998-2002), con un año de calentamiento de este. Los resultados de los estadísticos son poco aceptables con un NSE=-1.23, PBIAS=32.87, y R²=0.07.

$$NSE = 1 - \left(\frac{59.45}{26.71} \right) \rightarrow NSE \cong -1.23$$

$$PBIAS = \left(\frac{3210.18}{97.66} \right) \rightarrow PBIAS \cong 32.87$$

$$R^2 = \left(\frac{27.32}{(108.23 * 106.03)^{0.5}} \right)^2 \rightarrow R^2 \cong 0.07$$

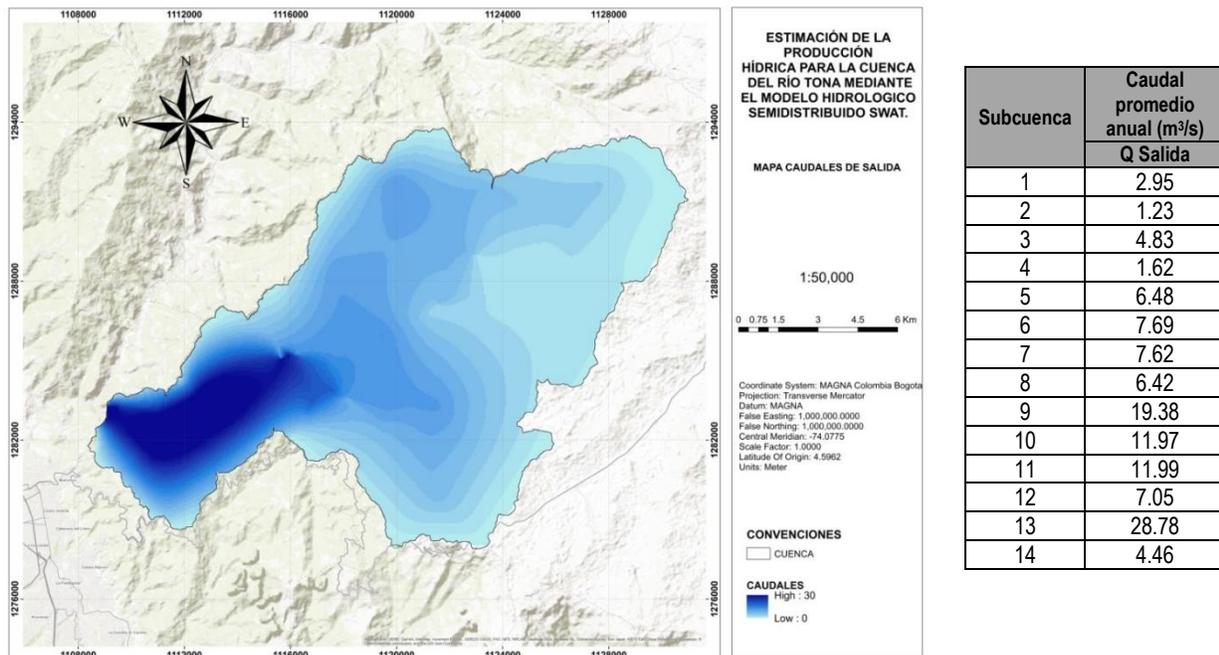
Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT.



Gráfica 4. Validación del modelo calibrado para el período 1989-2002.

Una razón para la inconsistencia reportada para el período de validación es que éste es muy corto (solo cuatro años) y corresponde con un período La Niña que, de acuerdo al indicador ONI (Oceanic Niño Index), comenzó en el trimestre Junio-Julio-Agosto de 1998 y terminó en el trimestre Enero-Febrero-Marzo de 2001 [42]. Se observa en la Gráfica 4 que los caudales observados están generalmente por encima de los modelados.

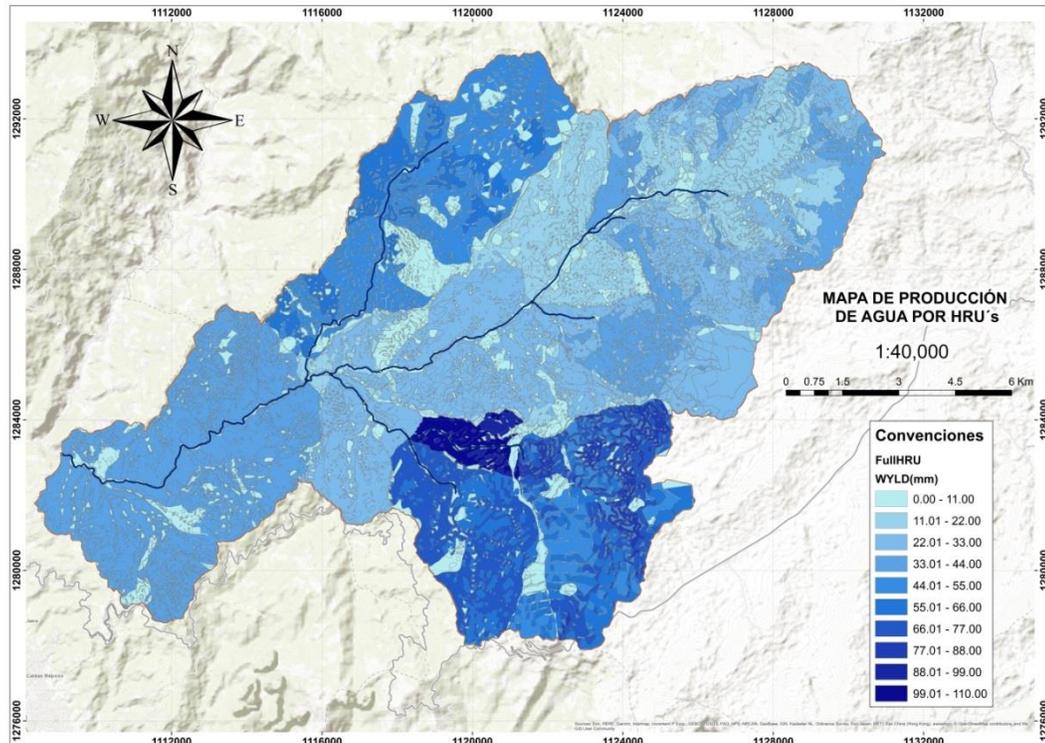
Los resultados de la modelación permiten presentar la distribución de los caudales promedios anuales en la cuenca (ver Mapa 10).



Mapa 10. Mapa de distribución de los caudales de salida simulados por el modelo (promedios anuales).

Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT.

Finalmente, el *Mapa 11* muestra los promedios anuales de producción hídrica a nivel de HRU. La escala de colores muestra en azul oscuro las HRU con mayor producción y en azul claro las de menor producción hídrica. El mapa permite identificar las áreas de mayor producción donde se pueden enfocar los esfuerzos de conservación por parte de los manejadores de la cuenca.



Mapa 11. Mapa de producción hídrica por HRU's.

7. MODELACIÓN DE LA PRODUCCIÓN HÍDRICA DE LA CUENCA PARA ESCENARIOS FUTUROS.

Como se presentó en la sección 5.4 de la metodología, se corrieron 6 escenarios que combinaron diferentes usos del suelo y climas futuros. Los datos de clima (precipitación y temperatura) se ingresaron al modelo calibrado tal y como se mostró en la sección 5.2.3. de la metodología, pero para los datos climatológicos escalados (ver sección 5.4.2). Los cambios en el uso del suelo se realizaron con la herramienta “Land Use Update”, que se accede siguiendo la ruta “Edit SWAT Input / Watershed Data / Land Use Update (.LUP)”. Para los escenarios 3 al 6 de la *Tabla 25*, se realizaron dos corridas: una para cambio de uso al 50% del área inicial y otra para cambio de uso al 100% del área inicial. La *Figura 25* muestra la interface donde se configuraron los cambios de uso dentro de ArcSWAT.

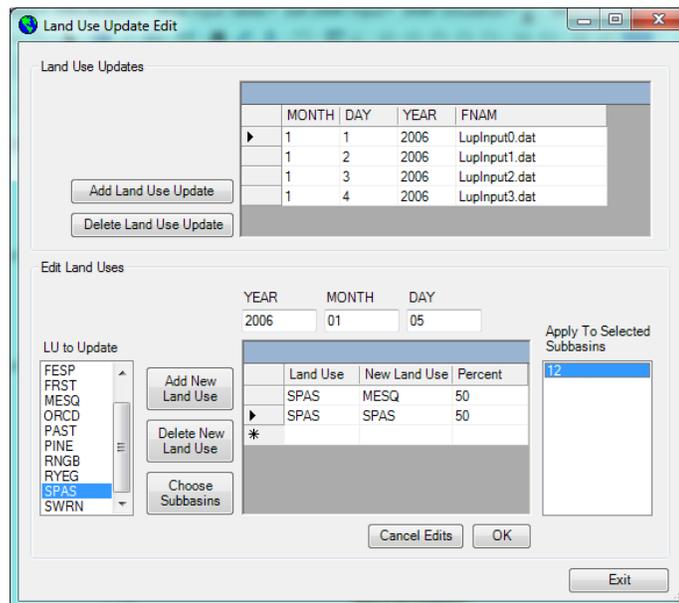


Figura 25 .Ventana para la configuración de cambios de uso del suelo en Arcswat.

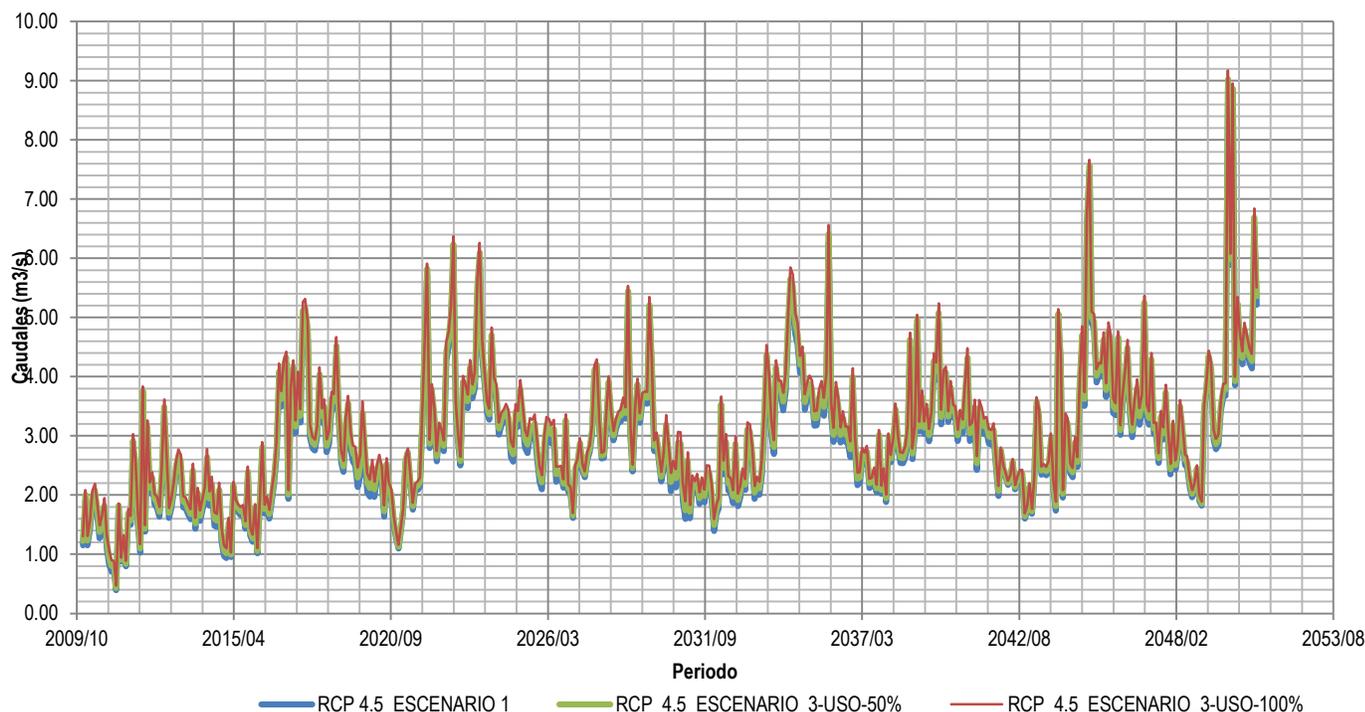
La corrida del modelo para los diferentes escenarios permitió obtener caudales simulados en la estación Puente Tona junto con los componentes del balance hídrico. Dado que se tiene un marco de referencia que es el uso del suelo actual, a continuación, se presentan resultados de las diferentes simulaciones organizados primero por el clima usado para la simulación y comparados con los resultados para las condiciones de uso del suelo actual. Es decir, primero se presentan los resultados de los escenarios 1, 3, y 5 (RCP 4.5) y luego los de los escenarios 2, 4, y 6 (RCP 8.5). Los escenarios 3 y 5 se presentan comparados con el escenario 1, y los escenarios 4 y 6, comparados con el escenario 2.

7.1. Resultados globales de la modelación para los escenarios 1, 3, y 5 (RCP 4.5).

La modelación de los escenarios 3 y 5 resultó en un incremento de la producción hídrica de la cuenca, al compararla con el escenario 1 de la siguiente manera: un incremento de 5.88% para el caso de cambios de uso del suelo al 100% representados por el escenario B (ver Gráfica 5 y Tabla 27), mientras que el aumento fue de 2.88% para el caso de cambios de uso del suelo al 100% representados por el escenario C (ver Gráfica 6 y Tabla 28). Es interesante resaltar que en términos de evapotranspiración real (ET), para el caso de cambios en el uso del suelo al 100% del escenario B, se observa un balance entre el incremento de la producción

Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT.

hídrica (5.88%) y de las pérdidas por ET (5.22%), mientras que para el caso del escenario C, se observa que aunque hay un incremento de la producción hídrica de 2.88%, las pérdidas por ET incrementan en un 4.75%.

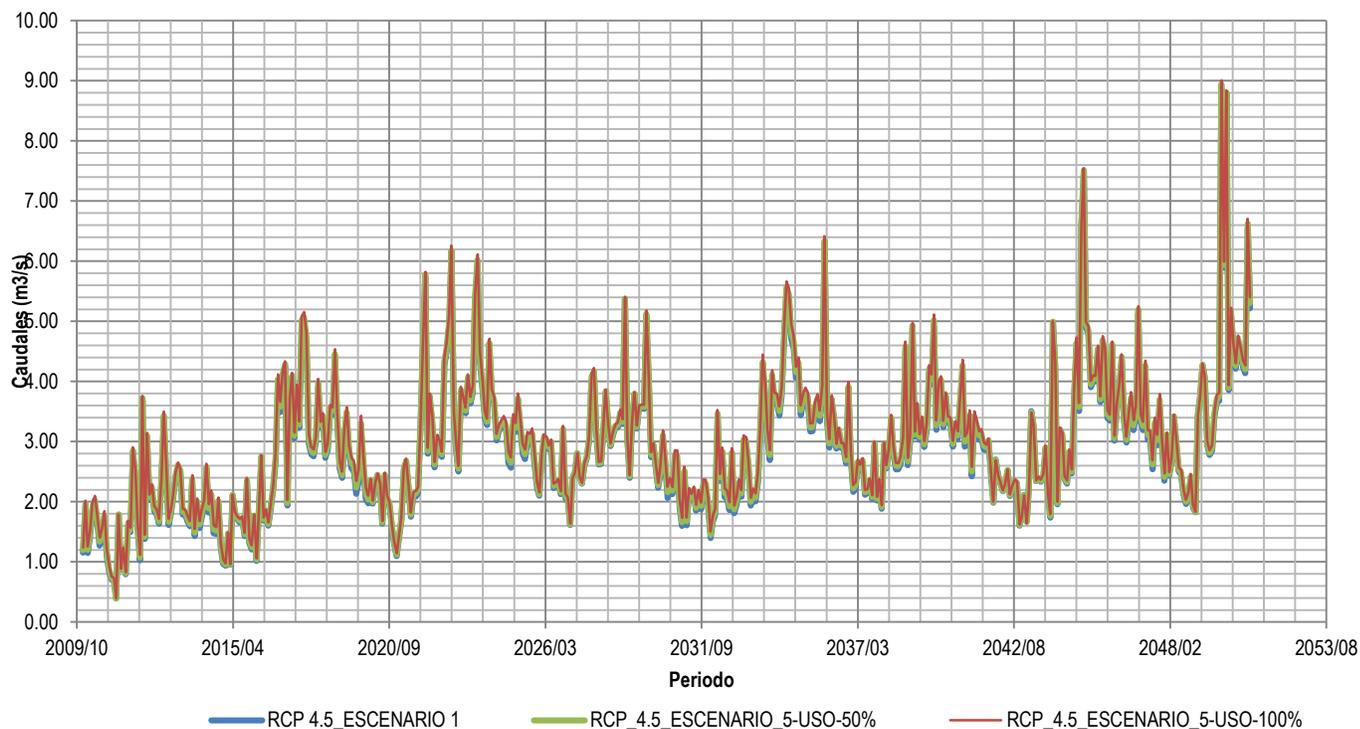


Gráfica 5. Caudales simulados RCP 4.5, escenarios 1 y 3.

Parámetro (mm)	RCP 4.5_ESCENARIO 1	RCP_4.5_ESCENARIO_3 -USO-100%	% Variación	RCP_4.5_ESCENARIO_3-USO-50%	% Variación
Precipitación	1334.80	1334.80		1334.80	
Snow fall	0	0		0	
Snow melt	0	0		0	
Sublimation	0	0		0	
Surface runoff Q	14.44	15.15	4.92	14.79	2.42
Lateral soil Q	145.2	150.05	3.34	147.62	1.67
Tile Q	0	0		0	
Grounwater (shal aq) Q	279.41	301.31	7.84	290.34	3.91
Grounwater (deep aq) Q	149.26	156.38	4.77	152.82	2.39
Revap	154.66	155.05	0.25	154.85	0.12
Deep aq recharge	150.97	158.09	4.72	154.52	2.35
Total aq recharge	656.38	687.34	4.72	671.84	2.36
Total water yld	588.31	622.89	5.88	605.56	2.93
Percolation out of soil	662.49	693.56	4.69	678	2.34
ET	653.19	687.28	5.22	670.22	2.61
PET	1298.01	1298.08	0.01	1298.01	0.00
Transmission loss	0	0		0	

Tabla 27. Valores anuales del balance hídrico de la cuenca, escenarios 1 y 3, RCP 4.5.

Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT.



Gráfica 6. Caudales simulados RCP 4.5, escenarios 1 y 5.

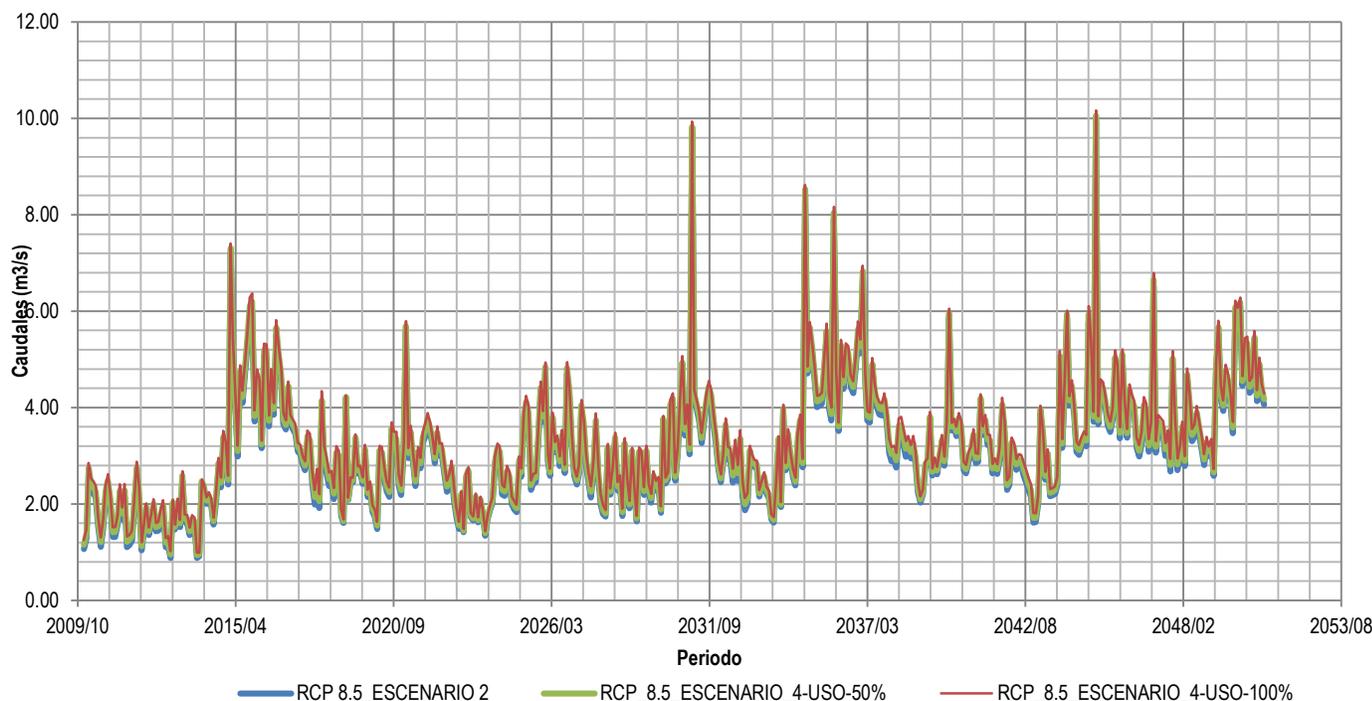
Parámetro (mm)	RCP 4.5_ ESCENARIO 1	RCP_4.5_ESCENARIO_5-USO-100%	% Variación	RCP_4.5_ESCENARIO_5-USO-50%	% Variación
Precipitación	1334.80	1334.80		1334.80	
Snow fall	0	0		0	
Snow melt	0	0		0	
Sublimation	0	0		0	
Surface runoff Q	14.44	14.26	1.25	14.35	0.62
Lateral soil Q	145.2	146.72	1.05	145.95	0.52
Tile Q	0	0		0	
Grounwater (shal aq) Q	279.41	291.48	4.32	285.44	2.16
Grounwater (deep aq) Q	149.26	152.77	2.35	151.01	1.17
Revap	154.66	154.84	0.12	154.75	0.06
Deep aq recharge	150.97	154.48	2.32	152.72	1.16
Total aq recharge	656.38	671.63	2.32	663.98	1.16
Total water yld	588.31	605.23	2.88	596.75	1.43
Percolation out of soil	662.49	677.84	2.32	670.14	1.15
ET	653.19	684.2	4.75	668.68	2.37
PET	1298.01	1298.09	0.01	1298.01	0.00
Transmission loss	0	0		0	

Tabla 28. Valores anuales del balance hídrico de la cuenca, escenarios 1 y 5, RCP 4.5.

7.2. Resultados globales de la modelación para los escenarios 2, 4, y 6 (RCP 8.5).

La modelación de los escenarios 4 y 6 resultó en un incremento de la producción hídrica de la cuenca, al compararla con el escenario 2 de la siguiente manera: un incremento de 5.58% para el caso de cambios de uso del suelo al 100% representados por el escenario B (ver

Gráfica 5 y Tabla 27), mientras que el aumento fue de 2.93% para el caso de cambios de uso del suelo al 100% representados por el escenario C (ver Gráfica 7 y Tabla 29). La tendencia es similar a la de los escenarios 1, 3, y 5 cuando se comparan la producción hídrica y ET. Esto sugiere que la implementación de prácticas de conservación para mejorar la producción hídrica de la cuenca debe analizar los tipos de cobertura que puedan ofrecer más producción con menos pérdidas.

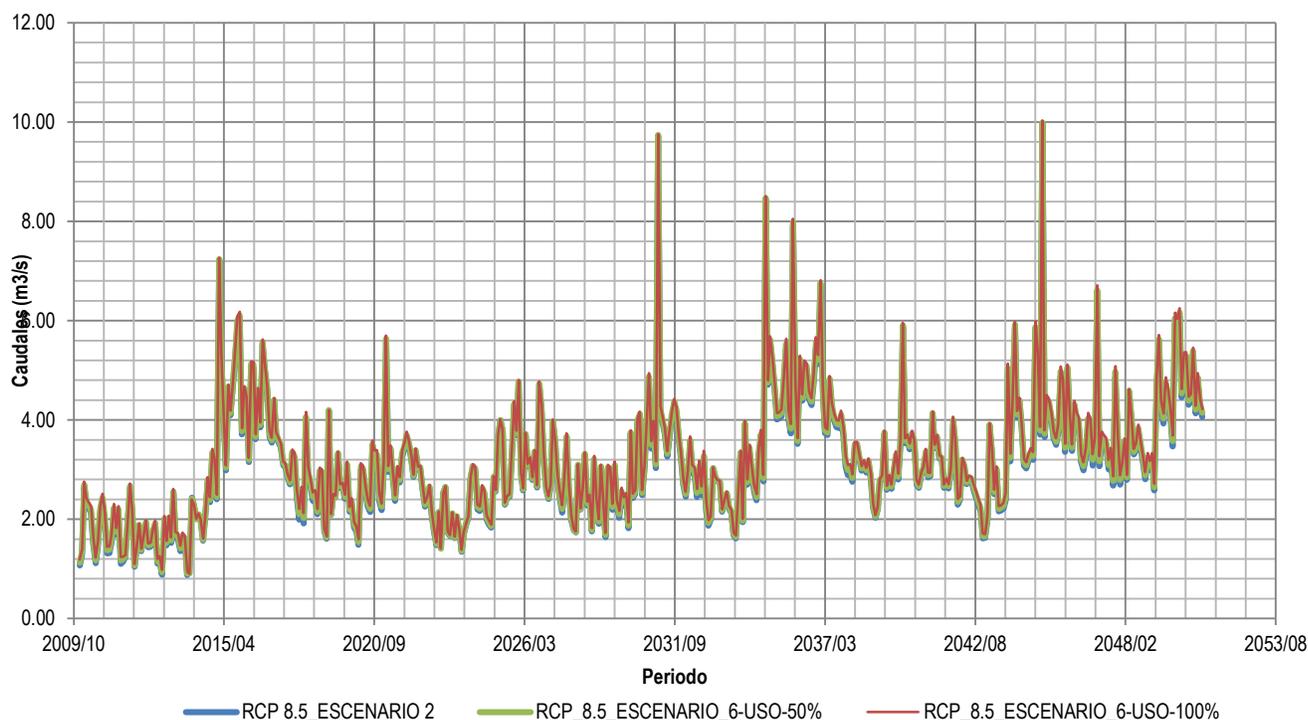


Gráfica 7. Caudales simulados RCP 8.5, escenarios 2 y 4.

Parámetro (mm)	RCP 8.5_ESCENARIO 1	RCP_8.5_ESCENARIO_4-USO-100%	% Variación	RCP_8.5_ESCENARIO_4-USO-50%	% Variación
Precipitación	1400.00	1400.00		1400.00	
Snow fall	0	0		0	
Snow melt	0	0		0	
Sublimation	0	0		0	
Surface runoff Q	19.78	20.62	4.25	20.2	2.12
Lateral soil Q	152.28	157.12	3.18	154.69	1.58
Tile Q	0	0		0	
Grounwater (shal aq) Q	297.06	319.31	7.49	308.17	3.74
Grounwater (deep aq) Q	158.48	165.6	4.49	162.04	2.25
Revap	155.46	155.83	0.24	155.64	0.12
Deep aq recharge	160.93	168.02	4.41	164.47	2.20
Total aq recharge	699.68	730.54	4.41	715.09	2.20
Total water yld	627.6	662.64	5.58	645.1	2.79
Percolation out of soil	704.93	735.8	4.38	720.35	2.19
ET	665.06	700.13	5.27	682.58	2.63
PET	1303.91	1303.98	0.01	1303.91	0.00
Transmission loss	0	0		0	

Tabla 29. Valores anuales del balance hídrico de la cuenca, escenarios 2 y 4, RCP 8.5.

Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT.



Gráfica 8. Caudales simulados RCP 8.5, escenarios 2 y 6.

Parámetro (mm)	RCP 8.5_ESCENARIO 2	RCP_8.5_ESCENARIO 6-USO-100%	% Variación	RCP_8.5_ESCENARIO 6-USO-50%	% Variación
Precipitación	1400.00	1400.00		1400.00	
Snow fall	0	0		0	
Snow melt	0	0		0	
Sublimation	0	0		0	
Surface runoff Q	19.78	19.51	1.37	19.64	0.71
Lateral soil Q	152.28	153.74	0.96	153.01	0.48
Tile Q	0	0		0	
Grounwater (shal aq) Q	297.06	310.7	4.59	303.86	2.29
Grounwater (deep aq) Q	158.48	162.02	2.23	160.25	1.12
Revap	155.46	155.63	0.11	155.54	0.05
Deep aq recharge	160.93	164.44	2.18	162.68	1.09
Total aq recharge	699.68	714.96	2.18	707.3	1.09
Total water yld	627.6	645.97	2.93	636.76	1.46
Percolation out of soil	704.93	720.21	2.17	712.54	1.08
ET	665.06	697.4	4.86	681.21	2.43
PET	1303.91	1303.99	0.01	1303.91	0.00
Transmission loss	0	0		0	

Tabla 30. Valores anuales del balance hídrico de la cuenca, escenarios 2 y 6, RCP 8.5.

En términos de la producción hídrica, cuando se comparan los resultados para RCP 4.5 y 8.5 (escenarios 1 y 2), se evidencia el incremento en la precipitación entre RCP 4.5 (1334.80 mm) y RCP 8.5 (1400.00 mm), equivalente a un 4.90% que resulta en el aumento de la producción de 39.29 mm (6.70%). Los resultados son similares cuando se comparan los escenarios 3 y 4 (con un incremento de la producción de 39.75 mm, 6.40%), y los escenarios 5 y 6 (incremento de la producción de 40.74 mm, 6.73%).

7.3. Resultados regionales (por subcuencas) de la modelación de la producción hídrica.

El análisis de la variación en la producción hídrica para condiciones actuales (modelo calibrado) en relación a los escenarios 1 y 2 apoyándose en la *Figura 26*, *Figura 27* y la *Tabla 31*, se observa en el modelo inicial la mayor producción hídrica concentrada en las subcuencas 12 y 14 seguidas por la 5 y 13 y para la parte alta y media de la cuenca se concentra la menor cantidad de producción hídrica, en cuanto al escenario 1 presenta condiciones similares al escenario 2 en término del rango de valores de la clasificación asignada exceptuando la subcuenca 7 que presenta un ligero aumento en la producción hídrica, para estos dos escenarios se presentan cambios en la parte baja del cuenca con la mayor cantidad de la producción hídrica seguida por las subcuencas 1, 2, 10 y 11 por último las subcuencas 4, 5, 12 y 14 con aumento en relación al modelo inicial, la zona media de la cuenca conserva relativamente los mismos rangos de valores, estas variaciones entre los modelos se debe al cambio en el aumento y disminución espacial de la precipitación en algunas subcuencas.

Los escenarios de uso de suelos al 100% presenta la mayor producción hídrica de todos los escenarios evaluados donde se observa que la subcuenca 13 es donde se concentra la mayor cantidad de producción seguida de la parte alta de la cuenca que en comparación a las condiciones iniciales anteriormente mencionadas eran las zonas de menor producción. Por lo tanto, para el escenario 3 y 4 en estas zonas superiores de la cuenca en donde el tipo de uso de suelos modificado a MESQ (evolución natural del terreno) genera mayor producción hídrica que el escenario 5 y 6 modificado a FRST (bosques plantados).

Las subcuencas para los escenarios 1 al 6 que presentan mayor variación en el incremento de la producción hídrica respecto a las condiciones iniciales (modelo calibrado) son la 1, 2 y 3 con el modelo climatológico:

- ✓ RCP 4.5: 129.23%, 115.14% y 99.70%.
- ✓ RCP 8.5: 143.28%, 127.92% y 116.65%.

Las subcuencas para los escenarios 1 al 6 que presentan variación en el decrecimiento de la producción hídrica respecto a las condiciones iniciales (modelo calibrado) son la 6, 12 y 14 con el modelo climatológico:

- ✓ RCP 4.5: 33.85%, 30.16%, 37.64%.
- ✓ RCP 8.5: 30.00%, 27.63%, 34.42%.

Sub-cuenca	WYLD (mm) Promedios anuales.										
	USO ACTUAL (Modelo calibrado)	RCP 4.5					RCP 8.5				
		ESCENARIOS									
		1_USO ACT.	3_USO -100%	3_USO -50%	5_USO -100%	5_USO -50%	2_USO ACT.	4_USO -100%	4_USO -50%	6_USO -100%	6_USO -50%
1	305.63	562.56	700.61	631.57	646.88	604.71	603.23	743.55	673.37	692.00	647.60
2	345.99	597.68	744.36	671.01	702.39	650.02	641.42	788.57	714.98	748.55	694.97
3	204.18	407.75	406.04	406.89	407.30	407.52	442.35	439.30	440.82	442.05	442.19
4	374.09	674.72	692.47	683.59	675.30	675.00	714.66	732.92	723.78	715.16	714.90
5	643.65	662.42	652.69	657.43	645.83	654.11	728.20	720.34	724.22	718.72	723.41
6	281.35	186.12	179.75	182.93	178.74	182.43	196.94	190.47	193.70	189.39	193.16
7	268.16	303.84	298.87	301.35	298.87	301.35	326.09	320.71	323.40	320.71	323.40
8	257.95	372.49	374.35	373.42	374.35	373.42	425.98	428.24	427.10	428.24	427.10
9	210.99	258.81	258.81	258.81	258.81	258.81	288.73	288.73	288.73	288.73	288.73
10	310.46	569.09	569.09	569.09	569.09	569.09	609.05	609.05	609.05	609.05	609.05
11	317.93	565.02	559.72	562.37	551.02	558.01	603.22	597.64	600.43	588.50	595.85
12	862.40	532.61	602.34	567.46	563.07	547.82	555.76	624.94	590.33	584.58	570.14
13	503.18	886.42	885.22	885.79	882.73	884.53	934.56	933.08	933.79	930.34	932.40
14	818.61	510.52	510.52	510.52	509.57	510.04	536.86	536.86	536.86	534.70	535.77

Tabla 31. Resultados de la producción hídrica promedio anual a nivel de subcuencas, escenarios 1 al 6.

Producción hídrica con el modelo climatológico MIROC5 RCP 4.5.

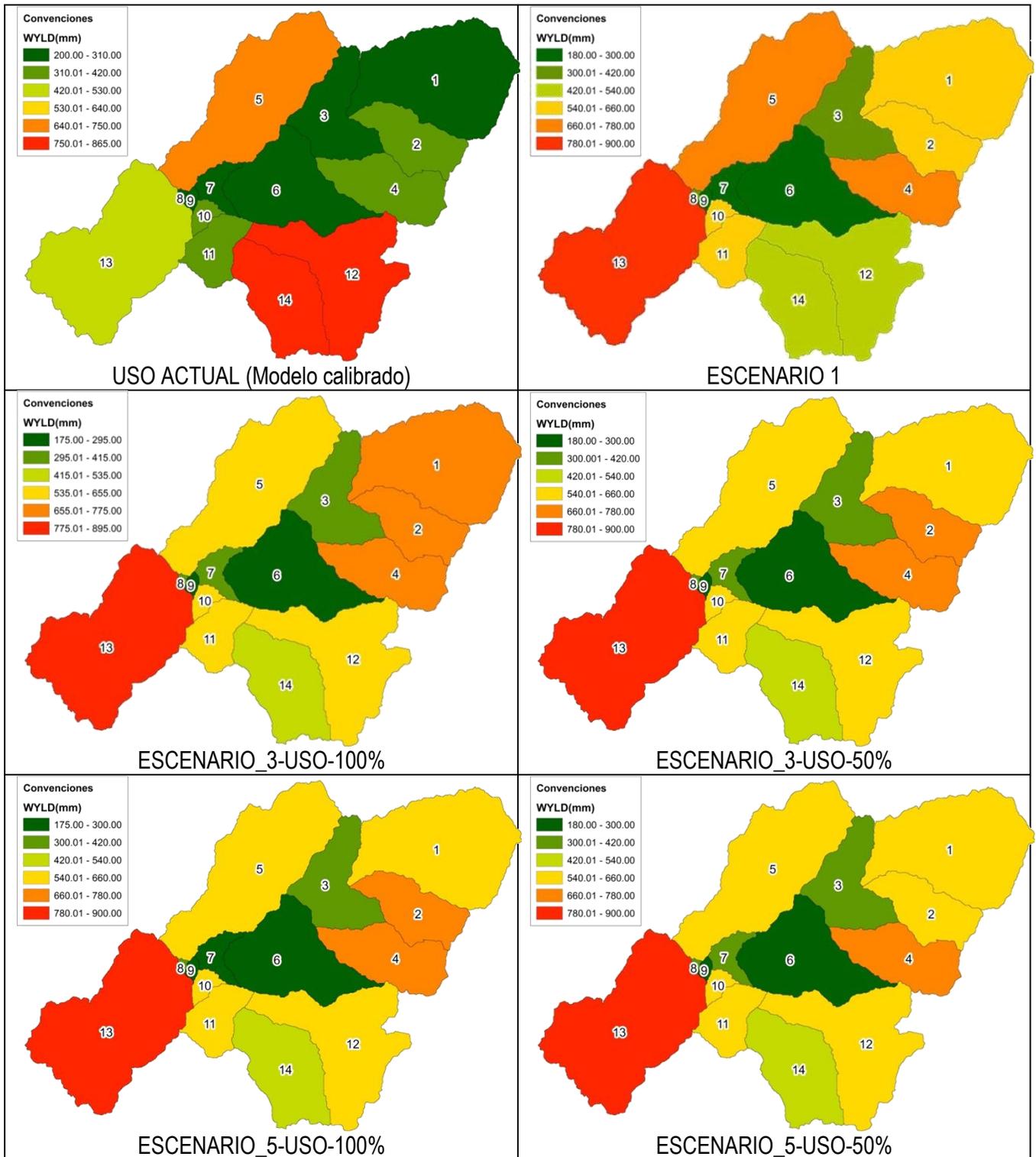


Figura 26. Producción hídrica por subcuencas, escenarios 1, 3 y 5.

Producción hídrica con el modelo climatológico MIROC5 RCP 8.5.

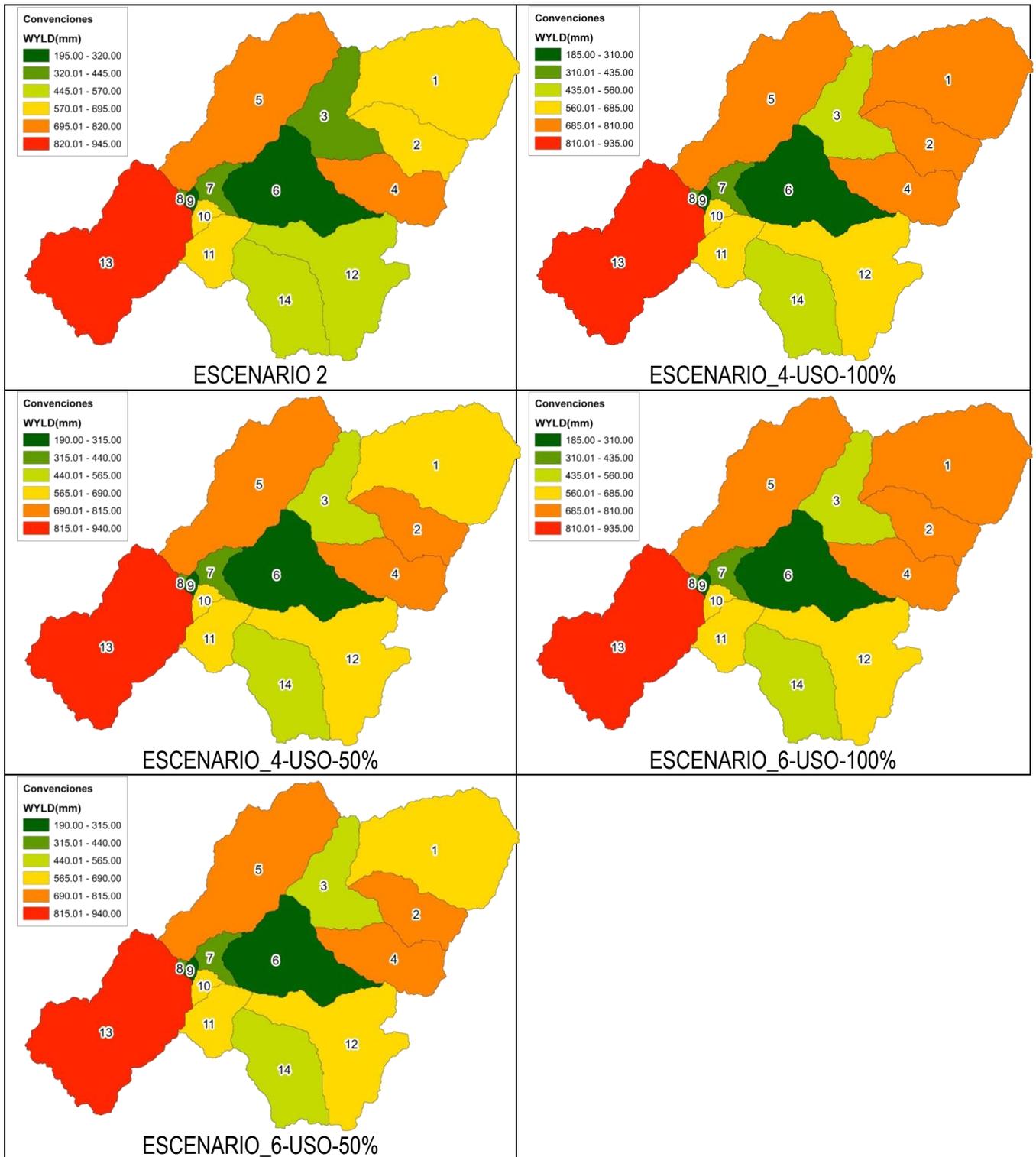


Figura 27. Producción hídrica por subcuencas, escenarios 2, 4 y 6.

7.4. Resultados regionales (por subcuencas) de la modelación de caudales.

La *Figura 28* y *Figura 29* muestran la variación de los caudales promedio anuales de salida por subcuencas donde se emplea la red hidrográfica principal mediante el grosor de cada línea que diferencia visualmente la cantidad de caudal, estas imágenes fueron extraídas de los datos de salida empleando el visor “SWAT Output Viewer” para cada una de las combinaciones de las modelaciones futuras especificadas en la *Tabla 25*, en donde se puede observar que los caudales de salida del modelo calibrado en comparación a los escenarios 1 y 2 se presentan aumentos de caudal en la mayoría de las subcuencas en relaciones hasta el doble y con decrecimientos en las subcuencas 10,11,12 y 14.

Los caudales simulados para diferentes escenarios de uso de suelo y clima RCP 4.5 y 8.5 de acuerdo a los resultados de la *Tabla 32*, no presentan una variación tan significativa entre estos, pero los escenarios al 100% son los que reportan mayor caudal lo que se relaciona directamente a la producción hídrica.

Para las subcuencas 10, 11, 12 y 14 en los escenarios 3 al 6 donde se modificaron los usos del suelo comparados con los escenarios 1 y 2 se presenta mayor flujo de caudal aunque por debajo de los caudales del modelo calibrado, esta situación de menores caudales para los escenarios 1 y 2 se debe principalmente al empleo de los modelos climáticos en cada uno de estos en donde estas subcuencas responden a menor flujo de caudal, esta disminución se ve igualmente reflejado en la producción hídrica de las subcuencas 12 y 14.

Sub-cuenca	FLOW_OUT(m3/s) Promedios anuales.										
	USO ACTUAL (Modelo calibrado)	RCP 4.5					RCP 8.5				
		ESCENARIOS									
		1_USO ACT.	3_USO -100%	3_USO -50%	5_USO -100%	5_USO -50%	2_USO ACT.	4_USO -100%	4_USO -50%	6_USO -100%	6_USO -50%
1	2.95	5.64	7.10	6.37	6.53	6.08	6.07	7.56	6.82	7.01	6.54
2	1.23	2.16	2.70	2.43	2.54	2.35	2.32	2.86	2.59	2.71	2.52
3	4.83	9.28	11.28	10.28	10.56	9.92	10.03	12.05	11.04	11.36	10.69
4	1.62	2.98	3.06	3.02	2.99	2.98	3.17	3.25	3.21	3.17	3.17
5	6.48	6.35	6.25	6.30	6.17	6.26	7.09	7.00	7.04	6.98	7.03
6	7.69	12.72	14.75	13.74	13.95	13.33	13.72	15.77	14.74	15.00	14.36
7	7.62	12.67	14.70	13.69	13.9	13.28	13.69	15.74	14.71	14.97	14.33
8	6.42	6.30	6.20	6.25	6.12	6.21	7.04	6.95	7.00	6.94	6.99
9	19.38	20.67	23.27	21.97	22.11	21.39	22.15	24.77	23.46	23.63	22.89
10	11.97	8.19	8.77	8.48	8.41	8.30	8.65	9.22	8.93	8.84	8.75
11	11.99	8.08	8.66	8.37	8.30	8.19	8.52	9.09	8.81	8.72	8.62
12	7.05	4.24	4.83	4.54	4.5	4.37	4.44	5.02	4.73	4.68	4.56
13	28.78	34.83	37.32	36.07	36.05	35.44	37.65	40.17	38.91	38.97	38.31
14	4.46	2.77	2.77	2.77	2.76	2.77	2.92	2.92	2.92	2.91	2.92

Tabla 32. Caudales de salida promedio anual a nivel de subcuencas escenarios 1 al 6.

Caudales de salida con el modelo climatológico MIROC5 RCP 4.5.

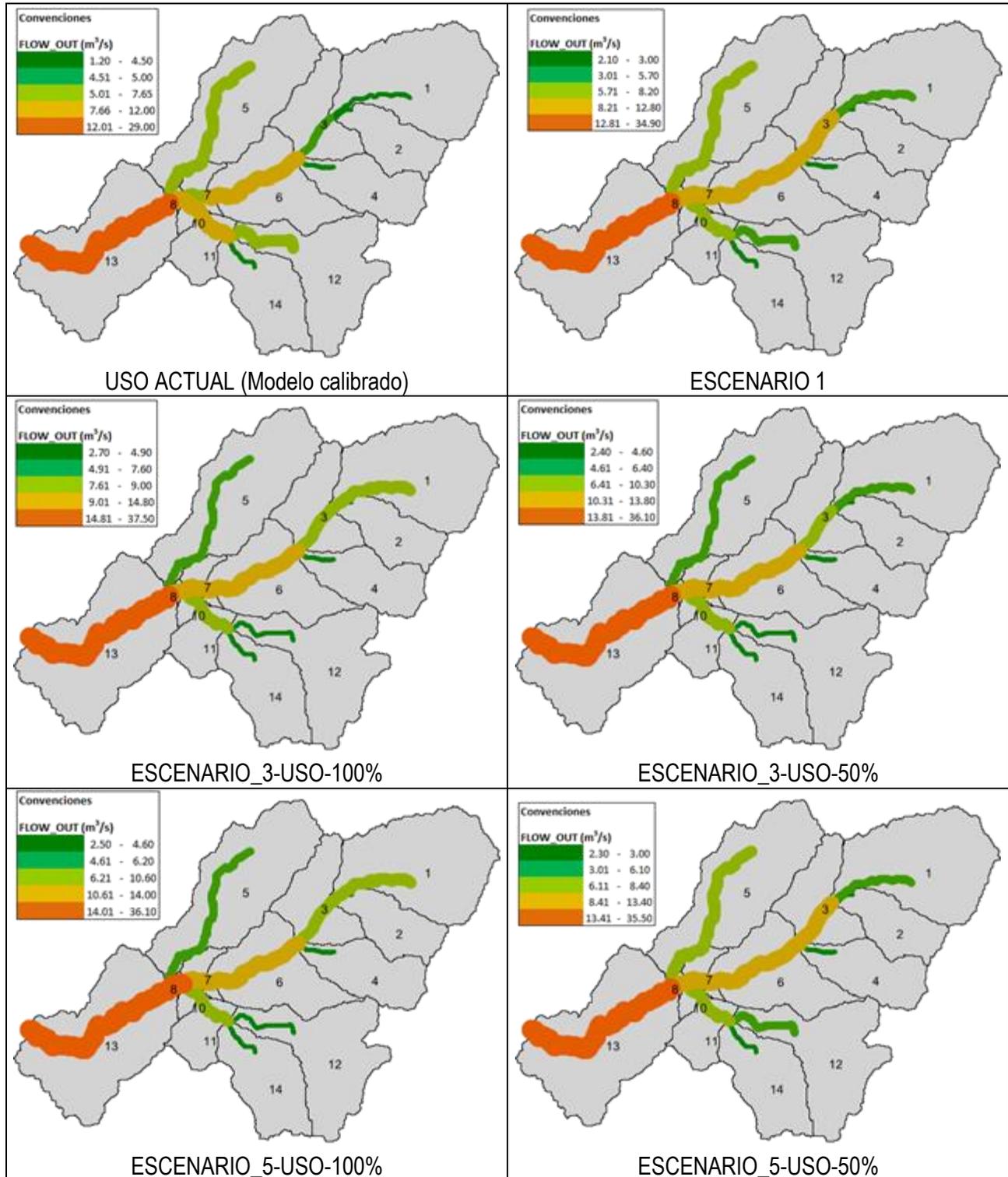


Figura 28. Caudales de salida por subcuencas, escenarios 1, 3, y 5.

Caudales de salida con el modelo climatológico MIROC5 RCP 8.5.

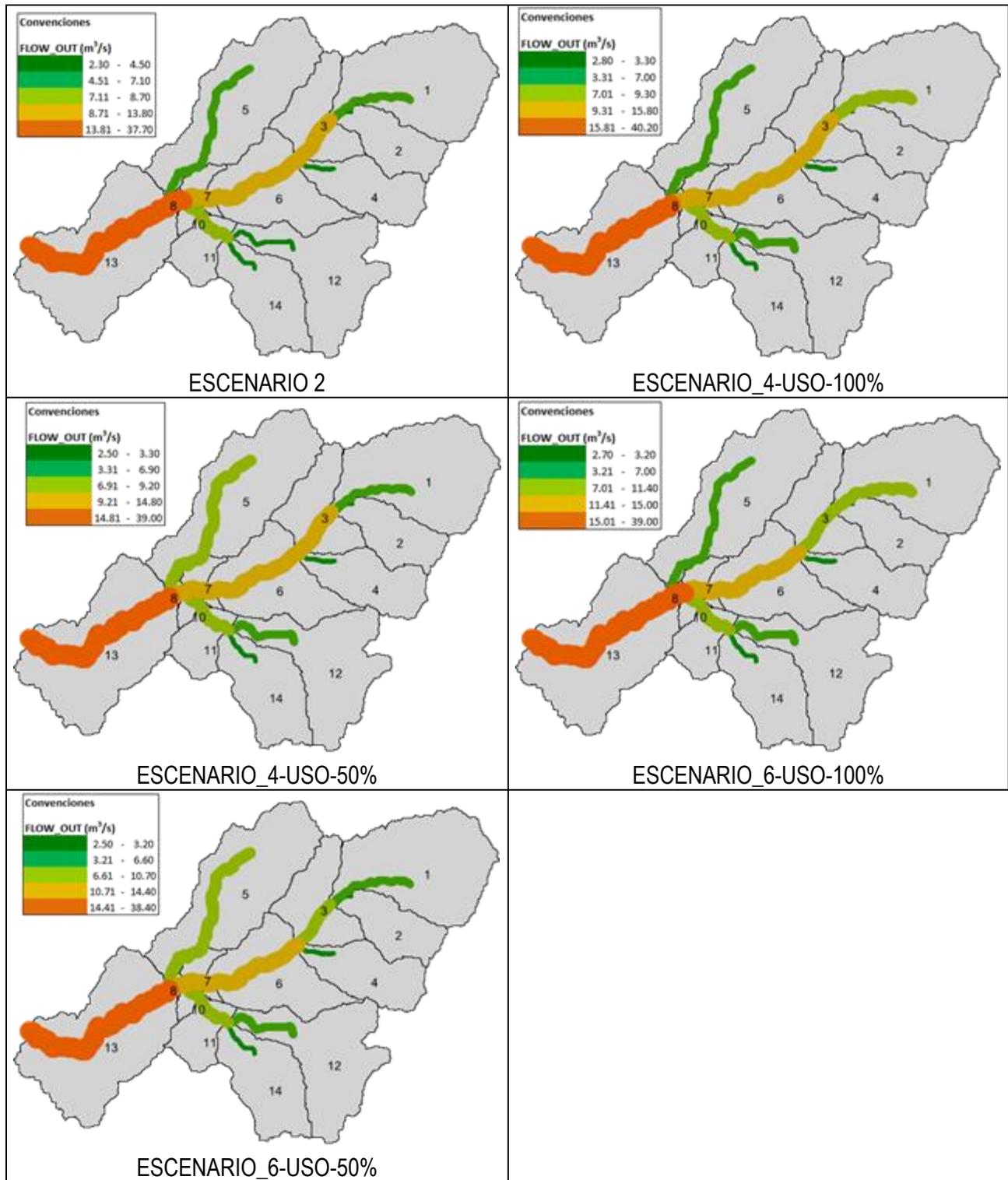


Figura 29. Caudales de salida por subcuenca, escenarios 2, 4 y 6.

8. ANALISIS DE RESULTADOS.

La primera corrida del modelo (sin calibración) para las condiciones iniciales donde únicamente se modificaron parámetros del método de evapotranspiración, coeficientes de flujo base (alpha_bf) en todas las subcuencas y los valores de TLAPS para la corrección de la temperatura, los resultados arrojados que de acuerdo a la herramienta swat check analizada en la sección 5.2.6.2 indica que la cuenca presenta un suelo permeable con un bajo número de curva en la capa superficial que permite el paso de gran cantidad de agua directamente a capas inferiores en eventos de precipitación, las capas subsuperficiales son las que directamente acumulan la mayor cantidad de agua para posteriormente circularlas mediante flujo lateral descargándolas a la corriente de agua lo cual se ve reflejado en el bajo almacenamiento de agua en el acuífero profundo debido a la mínima cantidad de agua que circula hacia esta zona.

Teniendo en cuenta la gráfica de los caudales simulados en la primera corrida (ver *Gráfica 2*) se presenta una tendencia a sobre estimar los caudales picos y base, por lo tanto para modificar estos inconvenientes en la calibración manual se empleó el parámetro (alpha_bf - coeficiente de flujo base) para reducir los valores de los caudales base que se encontraban elevados, otro parámetro de especial importancia en esta reducción fue el número de curva generando resultados más óptimos en algunas subcuencas, el valor de este parámetro debido a la reducción se acercó para algunas subcuencas a su mínimo valor 35.

Para la reducción de los caudales picos fue importante el empleo del parámetro SLSUBBSN donde a las subcuencas principales que reciben los aportes de las subcuencas de las partes altas de la cuenca se les aumento el valor de este parámetro en algunas cercano a su máximo valor 150, teniendo en cuenta que este parámetro es empleado para el cálculo del tiempo de flujo por tierra y dentro de la ecuación es directo a este cálculo lo cual indica el aumento de este tiempo, tiempo de flujo por tierra más el tiempo de flujo por el canal definen el tiempo de concentración que es inverso al caudal pico calculado que es una modificación de la fórmula del método racional para caudales máximos, lo anterior refleja matemáticamente la disminución de los caudales picos del modelo empleando este parámetro.

El aumento de los coeficientes RCHRG_DP y GW_REVAP en 4.6 y 6 veces respectivamente del valor por defecto permitió que se aumentara el flujo hacia el acuífero profundo y con ello se disminuyera el flujo total correspondiente al flujo superficial que descarga en el afluente reflejándose en los caudales, en cuanto al parámetro GWQMN como valor global para toda la cuenca no presento mejorías en el caudal pero por subcuencas el aumento va entre 1.29 y 2.8 veces del valor por defecto donde su respuesta es más positiva.

En el chequeo de revisión para la calibración manual se emplea el cálculo de los indicadores de eficiencia NSE, PBIAS y R² para cada una de las simulaciones ejecutadas pero como principal objetivo el NSE, se tuvo en cuenta si en la simulación realizada el indicador NSE era optimo el valor para el parámetro modificado se aceptaba para la calibración, es importante mencionar que cada parámetro modificado guarda determinada correlación con los demás parámetros del modelo, los valores de los indicadores inicial, medio y final fueron:

Indicador	Simulación de calibración		
	1	17	34
NSE	-1.96	-1.46	0.48
PBIAS	-2.54	20.11	0.18
R2	0.09	0.07	0.48

Tabla 33. Resultado de indicadores estadísticos.

En las simulaciones realizadas los indicadores NSE y R^2 presentaron poca variación, en cuanto al PBIAS aumento en la subestimación de los caudales simulados respecto a los observados, el indicador de la calibración correspondiente a la simulación 34 y de acuerdo a la *Tabla 3* el NSE se encuentra en un rango insatisfactorio aunque muy cercano al satisfactorio por la diferencia de 0.03 y el PBIAS como satisfactorio que adoptado para la calibración del modelo.

El procedimiento de calibración redujo en un 2.42% la producción hídrica con respecto al modelo sin calibración, en donde el ajuste de parámetros mencionados en la *Tabla 20* modificó significativamente la cantidad del flujo de agua dentro de las capas del suelo correspondientes a las variables de la producción hídrica, el flujo superficial y lateral se redujeron en un 77.28% y 54.75% respectivamente, el flujo subterráneo compenso estas reducciones presentadas en la superficie y la capa subsuperficial con el mayor aumento en el flujo del acuífero profundo y seguido del acuífero superficial para sus recargas pasando de 6.73mm a 156.52mm y 108.37mm a 172.09mm respectivamente, lo cual indica que el modelo calibrado infiltra buena parte del agua en las capas profundas que posteriormente son drenadas fuera de la cuenca.

Los incrementos de las variables de la producción hídrica de acuerdo a los resultados presentados en las tablas de los balances hídricos (sección 6) se ven directamente afectados en primer lugar a los escenarios de los usos de suelos a modificar en donde el escenario 3 y 4 al 50% tiende a presentar valores similares al escenario 5 y 6 al 100%, lo cual indica que el escenario 5 y 6 al 50% en términos del uso de suelos es el que presenta menor aumento en la producción hídrica, adicionalmente la variación de estos resultados se ve directamente influida por el tipo de modelo climatológico en donde el RCP 8.5 presenta 1.049 veces la cantidad de precipitación promedio anual del RCP 4.5 lo cual con lleva al aumento de la producción hídrica en cada uno de los escenarios modificados al 50% y el 100%, esto se ve directamente reflejado en el aumento de caudales de la cuenca.

Las áreas de los usos de suelos por subcuencas para los modelos de los escenarios futuros se encuentran relacionados en las tablas del anexo 3, en donde:

- ✓ **Tabla 36:** áreas de los usos de suelos del *Mapa 5*.
- ✓ **Tabla 37:** áreas de los usos escenario 1 y 2.
- ✓ **Tabla 38, Tabla 39, Tabla 40, Tabla 41:** áreas de los escenarios de usos de suelos para condiciones futuras.

Los usos de suelos en los escenarios modificados al 100% que presentan mayor área en cada uno de estos fueron MESQ (bosque natural, rastrojo) con el 50% y FRST (bosque natural, secundario) con el 62.12% de la totalidad de la cuenca que equivalen a un aumento del 163.18% y 154.19% de sus áreas iniciales para el escenario 3, 4, 5 y 6 respectivamente.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

El desarrollo de este estudio se sustentó en material consultado a partir de fuentes confiables que proporcionaron información necesaria para el desarrollo de todas las fases ejecutadas, esta información se encuentra relacionada en la bibliografía (sección 10) de este documento, fue importante el empleo de documentación en inglés ya que gran cantidad de estudios nacionales e internacionales basados en el empleo del modelo hidrológico semidistribuido SWAT se encuentra en este idioma donde muestran las bondades y la importancia que ha sido la aplicación de este modelo en diferentes estudios y proyectos.

La calibración del modelo en el periodo de evaluación (1987-1997) fue llevado a cabo de manera global en el punto de la estación puente Tona mediante el desarrollo de dos procedimientos en primer lugar el método automático con SWAT-CUP en donde este software a partir de un conjunto de parámetros asignados y mediante un procedimiento de 6 iteraciones consecutivas sus resultados en función a los indicadores de eficiencia no fueron tan aceptables, lo cual dio pie a proceder a la calibración manual mediante la herramienta que brinda el modelo en donde se obtuvieron mejores resultados en la calibración que fueron reflejados en los indicadores, este último procedimiento como un método determinístico permitió configurar en el modelo el ajuste de los parámetros directamente, es importante tener en cuenta los datos de los caudales observados que fueron la base para la comparación de la simulación en donde esta serie de tiempo presenta insertidumbre en sus datos.

La modelación de los escenarios futuros mediante 10 simulaciones basadas en la mezcla de uso de suelos propuestos en el POAT para la cuenca y el modelo climatológico MIROC-5 con datos diarios escalados para escenarios de forzamiento radiativo RCP 4.5 y 8.5 desarrollado en el marco de los estudios de cambio climático realizados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), permiten ver que la diferencia entre los resultados de estos escenarios no fueron tan considerables aunque el cambio espacial de las respuestas de los resultados en relación al modelo inicial fue notorio.

El empleo del software “SWAT Output Viewer” fue de gran importancia para la visualización de los resultados arrojados por el modelo, los cuales son emitidos mediante archivos en distintos formatos que contienen tablas extensas donde se presenta la evaluación mensual de todo el periodo de cada simulación, esta visualización se realiza en forma de tablas resumidas, gráficas y figuras que fueron de gran ayuda principalmente para la lectura rápida de los caudales y producción hídrica arrojada en las diferentes simulaciones ejecutadas durante el estudio.

El proceso de refinamiento de las unidades de respuesta hidrológica HRU’s permitió simplificar el proceso del cálculo de la producción hídrica ya que con este método se genera la ventaja para que la emisión de resultados sea más ligera debido a que el software en el reporte de salida analiza cada uno de los meses en todos los años de la simulación para cada una de las HRU’s creadas en las subcuencas.

El cambio de los usos de suelos del escenario B de acuerdo a los resultados obtenidos se observa que esta cobertura presenta una mejor respuesta en cuanto a caudales y producción hídrica en especial por la cobertura MESQ, lo anterior refleja la importancia que presentan los usos de suelos dentro del ciclo hidrológico de la cuenca.

En la modelación de los escenarios futuros no se empleó un mapa de uso de suelos como insumo nuevo para estas simulaciones que representar ilustrativamente las zonas modificadas en cada una de las subcuencas, en vez de esto se empleó la herramienta que ofrece el modelo para el cambio de uso de suelos a partir del mapa inicial, se anexa a este documento las tablas correspondientes a las áreas modificadas de los diferentes usos de suelos en cada una de las subcuencas con el fin de presentar el cambio superficial.

Es importante aclarar que la confianza de estos resultados en la calibración se podría fortalecer si se contara con una mejor caracterización de los suelos de la cuenca, y con valores de caudal observado más certeros en los puntos intermedios de la misma (estaciones Arnania, Carrizal y Golondrinas), de tal manera que se pudiera trabajar en una estrategia de calibración regional. Aunque esto no es posible para los datos históricos con los que se realizó el trabajo, sí es factible para los datos más recientes.

Para un adecuado control sobre la cuenca se recomienda realizar trabajos futuros en el mejoramiento de la calibración actualizando los usos de suelos y suelos principalmente ya que no se contó con un mapa inicial que cumpliera con los requerimientos de SWAT, con el fin de permita establecer el comportamiento óptimo basado en la identificación de los parámetros de mayor importancia que afectan los procesos de producción hídrica en las diferentes subcuencas y así poder tener una caracterización real y más profunda de la cuenca.

Se recomienda tener precaución con los resultados obtenidos en este estudio para la aplicación en las decisiones relacionadas sobre la administración del recurso hídrico de la cuenca, debido a las incertidumbres por los inconvenientes generados en el proceso de calibración y validación del modelo como fue mencionado anteriormente.

10. BIBLIOGRAFÍA.

- [1] UN-WATER, «Climate Change Adaptation: The Pivotal Role of Water. The United Nations Inter-Agency Mechanism on all Freshwater Related Issues Including Sanitation,» 2010.
- [2] IPCC, «Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación,» Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Ginebra, Suiza, 2007.
- [3] A. Stehr, P. Debels y J. L. Arumi, «Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático: experiencias de dos cuencas de la zona centro-sur de Chile,» *Scielo*, vol. I, n° 4, pp. 37-58, 2010.
- [4] Xu y Singh, «Review on Regional Water Resources Assessment Models under Stationary and Changing Climate,» *Water Resources Management*, vol. 18, pp. 591-612, 2004.
- [5] «Acueducto Metropolitano de Bucaramanga sa esp,» [En línea]. Available: <http://www.amb.com.co/frmlInformacion.aspx?inf=33>. [Último acceso: 15 Febrero 2018].
- [6] S. L. Dingman, «Hydrology: basic concepts and challenges,» de *Physical Hydrology*, Third ed., Long Grove, IL, Waveland Press, Inc., 2015, pp. 3-46.
- [7] J. J. Ordoñez Gálvez, Cartilla técnica ciclo hidrológico, Primera ed., Z. . I. Novoa Goicochea, Ed., Lima: Sociedad Geográfica de Lima, 2011.
- [8] F. J. Sánchez, «Evapotranspiración,» Salamanca, 2010.
- [9] S. Neitsch, J. Arnold, J. Kiniry y J. Williams, «Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009,» Texas, 2009.
- [10] O. C. González Gómez, «Ficha Técnica - Sistema de Información del Medio Ambiente,» Bogotá, 2011.
- [11] M. Villón, Hidrología, Segunda ed., Cartago: Instituto tecnológico de Costa Rica, 2004.
- [12] G. Monsalve Sáenz, Hidrología en la ingeniería, Segunda ed., C. Salazar Perdomo, Ed., Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería, 2012.
- [13] E. Custodio y M. R. Llamas, Hidrología Subterránea, Barcelona: Ed. Omega., 1996.
- [14] A. F. Breña Puyol y M. A. Jacobo Villa, Principios y fundamentos de la hidrología superficial, Mexico D.F.: Universidad Autónoma Metropolitana, 2006.
- [15] R. Heras, Métodos de cálculo del balance hídrico., A. Sokolov y T. Chapman, Edits., Madrid: Centro de estudios hidrográficos de España, 1981.
- [16] J. J. Ordoñez Gálvez, Cartilla técnica - Balance hídrico superficial, Primera ed., Z. I. Novoa Goicochea, Ed., Lima: Sociedad Geográfica de Lima, 2011.
- [17] M. A. Urrutia Rivas, «APLICACIÓN DE MODELO SWAT PARA LA SIMULACIÓN DEL CICLO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA ALTA DEL RIO SAN JUAN BAJO LA INFLUENCIA DE LA ACTIVIDAD MINERA,» M.Sc Tesis, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C, 2016.
- [18] K. D. Gayathri, B. P. Ganasri y G. S. Dwarakish, «INTERNATIONAL CONFERENCE ON WATER RESOURCES, COASTAL AND OCEAN ENGINEERING (ICWRCOE 2015) - A Review on Hydrological Models,» *ELSEVIER*, pp. 1001-1007, 2015.
- [19] V. M. Ponce, Engineering Hydrology: Principles and Practices - capítulo nº13, Prentice Hall, 1989.
- [20] A. Triviño Pérez y M. Morad, «Sistemas de información geográfica y modelizaciones hidrológicas: una aproximación a las ventajas y dificultades de su aplicación,» vol. XXXI, pp. 23-46, 2001.
- [21] J. P. Wilson, H. Mitasova y D. J. Wright, «Water Resource Applications of Geographic Information Systems,» *URISA diario*, vol. XII, pp. 61-79, 2000.
- [22] R. Jayakrishnan, R. Srinivasan, C. Santhi y J. G. Arnold, «Advances in the application of the SWAT model for

- water resources management,» *Hydrological processes*, vol. XIX, n° 3, pp. 749-762, Febrero 2005.
- [23] B. Faggetter, «OCEAN ECOLOGY,» 8 Septiembre 2015. [En línea]. Available: <http://www.oceanecology.ca/hydrology.htm#GISandHydrology>. [Último acceso: 8 Julio 2018].
- [24] S. Neitsch, J. Arnold, J. Kiniry, J. Williams y K. King, «SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL THEORETICAL DOCUMENTATION VERSION 2000,» Texas Water Resources Institute, College Station, Texas, Texas, 2002.
- [25] J. Arnold, J. Kiniry, R. Srinivasan, J. Williams, E. Haney y S. Neitsch, «Input/Output Documentation Version 2012 SWAT,» Texas Water Resources Institute, Texas, 2012.
- [26] K. C. Abbaspour, «SWAT-CUP SWATCalibration and Uncertainty Programs,» 2015.
- [27] J. G. Arnold, D. N. Moriasi, P. W. Gassman, K. C. Abbaspour, M. J. White, R. Srinivasan, C. Santhi, R. D. Harmel, A. van Griensven, M. W. Van Liew, N. Kannan y M. K. Jha, «SWAT: MODEL USE, CALIBRATION,» North Carolina, 2011.
- [28] P. Daggupati, N. Pai, S. Ale, K. R. Douglas-Mankin, R. W. Zeckoski, J. Jeong, P. B. Parajuli, D. Saraswat y M. A. Youssef, «A RECOMMENDED CALIBRATION AND VALIDATION STRATEGY FOR HYDROLOGIC AND WATER QUALITY MODELS,» *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, vol. LVIII, pp. 1705-1719, 2015.
- [29] D. N. Moriasi, J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Bingner, R. D. Harmel y T. L. Veith, «MODEL EVALUATION GUIDELINES FOR SYSTEMATIC QUANTIFICATION OF ACCURACY IN WATERSHED SIMULATIONS,» *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, vol. L, pp. 885-900, 2007.
- [30] H. V. Gupta, S. Sorooshian y P. O. Yapo, «STATUS OF AUTOMATIC CALIBRATION FOR HYDROLOGIC MODELS: COMPARISON WITH MULTILEVEL EXPERT CALIBRATION,» *JOURNAL OF HYDROLOGIC ENGINEERING*, vol. IV, n° 2, pp. 145-143, 1999.
- [31] Y. Brouziyne, A. Abouabdillah, R. Bouabid, L. Benaabidate y O. Oueslati, «SWAT manual calibration and parameters sensitivity analysis in a semi-arid watershed in North-western Morocco,» *Cross Mark*, pp. 1-13, 2017.
- [32] Gradex, «Plan de Ordenamiento Ambiental Territorial Microcuenca río Tona - capítulo 4».
- [33] N. H. Batjes, «SOTER-based soil parameter estimates for Latin America and the Caribbean,» ISRIC-World Soil Information, Wageningen, 2005.
- [34] A. R. Service, «Hydrology and Remote Sensing Laboratory: Beltsville, MD,» 5 2 2016. [En línea]. Available: <https://www.ars.usda.gov/research/software/download/?softwareid=492&modecode=80-42-05-10>. [Último acceso: 9 Julio 2018].
- [35] M. y. E. A. Instituto de Hidrología, «Atlas Climatológico de Colombia 1981 - 2010,» [En línea]. Available: <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasClimatologico.html>. [Último acceso: 9 Julio 2018].
- [36] M. Winchell, R. Srinivasan, M. Di Luzio y J. Arnold, «ARCSWAT INTERFACE FOR SWAT2012 USER'S GUIDE,» Texas, 2013.
- [37] J. Valencia Gómez, «Estimated Calibration Parameters in SWAT Model for Andean Watersheds,» 2013.
- [38] J. Kim, K. Son, I. Kim y J. Noh, «Impacts of GIS data quality on determination of runoff and suspended sediments,» *Geosciences Journal*, vol. XVI, n° 2, pp. 181-192, 2012.
- [39] D. Gómez y A. Rodríguez, «Aplicabilidad de datos climatológicos escalados para la modelación hidrológica de la cuenca del río Tona en Santander,» Bucaramanga, 2018.
- [40] Gómez y Gómez., «Baseflow analysis using master recession curves and numerical algorithms in mountain basins: Suratá's river and Oro's river (Santander, Colombia),» 2016.
- [41] Z. Yu, «SWAT Output Viewer,» [En línea]. Available: <https://swatviewer.com/>. [Último acceso: 16 04 2018].
- [42] «National weather service climate prediction center,» [En línea]. Available:

http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. [Último acceso: 12 Julio 2018].

11. ANEXOS

Anexo 1: Atributos de la tabla de suelos para la cuenca del Tona

OBJECTID	MUID	SEQN	SNAM	S5ID	CMPPCT	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXCL	SOL_CRK	TEXTURE
203	VT097	1	CO561A	CO5601	100	3	B	1500	0.5	0.5	FArGr - FArGr - ArGr
204	VT098	1	CO561B	CO5602	100	3	B	1500	0.5	0.5	FArGr - FArGr - FArGr
205	VT099	1	CO562	CO5603	100	2	B	1100	0.5	0.5	FArGr - FArGr
206	VT100	1	CO563	CO5604	100	4	B	1500	0.5	0.5	FArA - FA - FA - FA
207	VT101	1	CO564	CO5605	100	3	B	1000	0.5	0.5	FA - FLGr - FA
208	VT102	1	CO565A	CO5606	100	2	B	700	0.5	0.5	FAGr - Agr
209	VT103	1	CO565B	CO5607	100	2	B	700	0.5	0.5	FAGr - Agr
210	VT104	1	CO566A	CO5608	100	3	B	1500	0.5	0.5	FArA - FArA - FArA
211	VT105	1	CO566B	CO5609	100	4	B	1500	0.5	0.5	FA - FA - FA - FA
212	VT106	1	CO566C	CO5610	100	4	B	1500	0.5	0.5	FAGr - FAGr - FArA - FArA
213	VT107	1	CO567A	CO5611	100	2	B	1700	0.5	0.5	FArA - ArA
214	VT108	1	CO567B	CO5612	100	2	B	1700	0.5	0.5	FArA - ArA
215	VT109	1	CO568	CO5613	100	3	B	850	0.5	0.5	FAGr - FA - FA
216	VT110	1	CO569	CO5614	100	3	B	850	0.5	0.5	FAGr - FA - FA

OBJECTID	MUID	SEQN	SNAM	S5ID	SOL_Z1	SOL_BD1	SOL_AWC1	SOL_K1	SOL_CBN1	CLAY1	SILT1	SAND1	ROCK1	SOL_ALB1	USLE_K1
203	VT097	1	CO561A	CO5601	310	1.24	0.13	26.96	6.7	22	22	56	1	0.13	0.16
204	VT098	1	CO561B	CO5602	230	1.21	0.15	13.19	6.7	32	32	36	1	0.13	0.16
205	VT099	1	CO562	CO5603	470	1.24	0.14	16.18	6.7	28	26	46	1	0.13	0.16
206	VT100	1	CO563	CO5604	220	1.23	0.13	32.62	6.7	20	22	58	1	0.13	0.16
207	VT101	1	CO564	CO5605	280	1.2	0.14	40.01	6.7	18	26	56	1	0.13	0.17
208	VT102	1	CO565A	CO5606	500	1.24	0.11	46.76	6.7	16	16	68	1	0.13	0.15
209	VT103	1	CO565B	CO5607	500	1.24	0.11	46.76	6.7	16	16	68	1	0.13	0.15
210	VT104	1	CO566A	CO5608	230	1.23	0.13	27.45	6.7	22	24	54	1	0.13	0.16
211	VT105	1	CO566B	CO5609	220	1.19	0.12	56.81	6.7	14	22	64	1	0.13	0.17
212	VT106	1	CO566C	CO5610	250	1.24	0.12	38.72	6.7	18	18	64	1	0.13	0.16
213	VT107	1	CO567A	CO5611	300	1.28	0.12	20.92	6.7	24	17	59	1	0.13	0.15
214	VT108	1	CO567B	CO5612	300	1.28	0.12	20.92	6.7	24	17	59	1	0.13	0.15
215	VT109	1	CO568	CO5613	100	0.95	0.23	79.85	6.7	8	16	76	1	0.13	0.15
216	VT110	1	CO569	CO5614	100	0.95	0.23	79.85	6.7	8	16	76	1	0.13	0.15

OBJECTID	MUID	SEQN	SNAM	S5ID	SOL_Z2	SOL_BD2	SOL_AWC2	SOL_K2	SOL_CBN2	CLAY2	SILT2	SAND2	ROCK2	SOL_ALB2	USLE_K2
203	VT097	1	CO561A	CO5601	670	1.28	0.13	7.1	6.5	36	24	40	1	0.13	0.15
204	VT098	1	CO561B	CO5602	580	1.26	0.14	13.06	6.5	30	26	44	1	0.13	0.16
205	VT099	1	CO562	CO5603	1100	1.2	0.15	18.04	6.5	28	34	38	1	0.13	0.17
206	VT100	1	CO563	CO5604	420	1.22	0.13	38.73	6.5	18	24	58	1	0.13	0.17
207	VT101	1	CO564	CO5605	600	1.16	0.1	115.54	6.5	6	16	78	1	0.13	0.15
208	VT102	1	CO565A	CO5606	700	1.16	0.07	145.25	6.5	4	6	90	1	0.13	0.08
209	VT103	1	CO565B	CO5607	700	1.16	0.07	145.25	6.5	4	6	90	1	0.13	0.08
210	VT104	1	CO566A	CO5608	660	1.25	0.13	26.29	6.5	22	22	56	1	0.13	0.16
211	VT105	1	CO566B	CO5609	500	1.23	0.13	38.46	6.5	18	22	60	1	0.13	0.17
212	VT106	1	CO566C	CO5610	560	1.23	0.11	55.65	6.5	14	18	68	1	0.13	0.16
213	VT107	1	CO567A	CO5611	1700	1.36	0.12	3.5	6.5	38	13	49	1	0.13	0.13
214	VT108	1	CO567B	CO5612	1700	1.36	0.12	3.5	6.5	38	13	49	1	0.13	0.13
215	VT109	1	CO568	CO5613	520	1.02	0.2	92.87	6.5	6	10	84	1	0.13	0.11
216	VT110	1	CO569	CO5614	520	1.02	0.2	92.87	6.5	6	10	84	1	0.13	0.11

OBJECTID	MUID	SEQN	SNAM	S5ID	SOL_Z3	SOL_BD3	SOL_AWC3	SOL_K3	SOL_CBN3	CLAY3	SILT3	SAND3	ROCK3	SOL_ALB3	USLE_K3
203	VT097	1	CO561A	CO5601	1500	1.24	0.12	3.65	6.1	50	30	20	1	0.13	0.16
204	VT098	1	CO561B	CO5602	1500	1.26	0.14	21.35	6.1	24	24	52	1	0.13	0.16
205	VT099	1	CO562	CO5603	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
206	VT100	1	CO563	CO5604	740	1.21	0.12	63.51	6.1	12	24	64	1	0.13	0.17
207	VT101	1	CO564	CO5605	1000	1.14	0.11	124.85	6.1	4	26	70	1	0.13	0.18
208	VT102	1	CO565A	CO5606	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
209	VT103	1	CO565B	CO5607	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
210	VT104	1	CO566A	CO5608	1500	1.3	0.13	16.4	6.1	26	20	54	1	0.13	0.16
211	VT105	1	CO566B	CO5609	840	1.19	0.11	91.02	6.1	8	22	70	1	0.13	0.17
212	VT106	1	CO566C	CO5610	860	1.33	0.13	8.3	6.1	32	18	50	1	0.13	0.15
213	VT107	1	CO567A	CO5611	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
214	VT108	1	CO567B	CO5612	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
215	VT109	1	CO568	CO5613	850	1.07	0.2	65.11	6.1	10	14	76	1	0.13	0.14
216	VT110	1	CO569	CO5614	850	1.07	0.2	65.11	6.1	10	14	76	1	0.13	0.14

Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT.

OBJECTID	MUID	SEQN	SNAM	S5ID	SOL_Z4	SOL_BD4	SOL_AWC4	SOL_K4	SOL_CBN4	CLAY4	SILT4	SAND4	ROCK4	SOL_ALB4	USLE_K4
203	VT097	1	CO561A	CO5601	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
204	VT098	1	CO561B	CO5602	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
205	VT099	1	CO562	CO5603	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
206	VT100	1	CO563	CO5604	1500	1.22	0.12	63.87	6.1	12	22	66	1	0.13	0.17
207	VT101	1	CO564	CO5605	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
208	VT102	1	CO565A	CO5606	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
209	VT103	1	CO565B	CO5607	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
210	VT104	1	CO566A	CO5608	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
211	VT105	1	CO566B	CO5609	1500	1.17	0.11	106.9	6.1	6	24	70	1	0.13	0.17
212	VT106	1	CO566C	CO5610	1500	1.28	0.12	36.37	6.1	18	18	64	1	0.13	0.16
213	VT107	1	CO567A	CO5611	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
214	VT108	1	CO567B	CO5612	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
215	VT109	1	CO568	CO5613	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
216	VT110	1	CO569	CO5614	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

CAMPO	DEFINICIÓN DEL CAMPO
OBJECTID	
MUID	Unique code identifier
SEQN	Sequential number assigned
SNAM	Soil Name
S5ID	
CMPPCT	Not defined
NLAYERS	Number of soil layers
HYDGRP	Soil Hydraulic Group (A,B,C,or D)
SOL_ZMX	Maximum rooting depth of soil profile (mm)
ANION_EXCL	Fraction of porosity (void space) from which anions are excluded
SOL_CRK	Potential or maximum crack volume of the soil profile
TEXTURE	Texture of soil layer
SOL_Z	Depth from soil surface to bottom of layer (mm)
SOL_BD	Moist bulk density (Mg/m3 or g/cm3).
SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer - plant available water (mm H2O/mm soil)
SOL_K	Saturated hydraulic conductivity (mm/hr)
SOL_CBN	Organic carbon content (% soil weight)
CLAY	Clay content (% soil weight)
SILT	Silt content (% soil weight)
SAND	Sand content (% soil weight)
ROCK	Rock fragment content (% soil weight)
SOL_ALB	Moist soil albedo
USLE_K	USLE equation soil erodibility (K) factor (units: 0.013 (metric ton m2 hr) / (m3-metric ton cm))
SOL_EC	Electrical conductivity (dS/m)

*Las celdas sombreadas en esta tabla se repiten de acuerdo con el número de capas que tenga el suelo

Anexo 2: Unidades de respuesta hidrológica HRU's.

No	HRUGIS	HRU	No	HRUGIS	HRU	No	HRUGIS	HRU
1	10001	1_MESQ_CO561A_25-50	40	30002	3_MESQ_CO563_50-9999	79	50015	5_RYEG_CO567B_25-50
2	10002	1_MESQ_CO561A_50-9999	41	30003	3_MESQ_CO563_0-5	80	50016	5_RYEG_CO567B_50-9999
3	10003	1_MESQ_CO561B_10-25	42	30004	3_FRST_CO563_25-50	81	60001	6_MESQ_CO565A_25-50
4	10004	1_MESQ_CO561B_25-50	43	30005	3_FRST_CO563_50-9999	82	60002	6_MESQ_CO565A_50-9999
5	10005	1_MESQ_CO561B_50-9999	44	30006	3_RYEG_CO563_50-9999	83	60003	6_PAST_CO565A_25-50
6	10006	1_PAST_CO561A_50-9999	45	30007	3_RYEG_CO563_25-50	84	60004	6_PAST_CO565A_50-9999
7	10007	1_PAST_CO561A_25-50	46	30008	3_SWRN_CO563_25-50	85	60005	6_FRST_CO565A_25-50
8	10008	1_PAST_CO561A_10-25	47	30009	3_SWRN_CO563_50-9999	86	60006	6_FRST_CO565A_50-9999
9	10009	1_PAST_CO561A_0-5	48	40001	4_MESQ_CO564_25-50	87	60007	6_RYEG_CO565A_25-50
10	10010	1_PAST_CO561B_25-50	49	40002	4_MESQ_CO564_0-5	88	60008	6_RYEG_CO565A_50-9999
11	10011	1_PAST_CO561B_50-9999	50	40003	4_MESQ_CO564_50-9999	89	60009	6_SWRN_CO565A_25-50
12	10012	1_RNGB_CO561A_25-50	51	40004	4_MESQ_CO564_10-25	90	60010	6_SWRN_CO565A_50-9999
13	10013	1_RNGB_CO561B_10-25	52	40005	4_PINE_CO564_10-25	91	70001	7_MESQ_CO565B_0-5
14	10014	1_RNGB_CO561B_25-50	53	40006	4_PINE_CO564_0-5	92	70002	7_MESQ_CO565B_25-50
15	10015	1_RNGB_CO561B_50-9999	54	40007	4_PINE_CO564_25-50	93	70003	7_MESQ_CO565B_50-9999
16	10016	1_FRST_CO561A_50-9999	55	40008	4_PINE_CO564_50-9999	94	70004	7_RYEG_CO565B_0-5
17	10017	1_FRST_CO561A_25-50	56	40009	4_FRST_CO564_25-50	95	70005	7_RYEG_CO565B_25-50
18	10018	1_FRST_CO561B_25-50	57	40010	4_FRST_CO564_10-25	96	70006	7_RYEG_CO565B_50-9999
19	10019	1_FRST_CO561B_10-25	58	40011	4_FRST_CO564_0-5	97	80001	8_RNGB_CO567B_25-50
20	10020	1_FRST_CO561B_50-9999	59	40012	4_FRST_CO564_50-9999	98	80002	8_RNGB_CO567B_50-9999
21	10021	1_FESP_CO561A_50-9999	60	40013	4_FESP_CO564_10-25	99	80003	8_RYEG_CO567B_50-9999
22	10022	1_FESP_CO561A_25-50	61	40014	4_FESP_CO564_0-5	100	80004	8_RYEG_CO567B_0-5
23	10023	1_FESP_CO561B_50-9999	62	40015	4_FESP_CO564_25-50	101	80005	8_RYEG_CO567B_25-50
24	10024	1_FESP_CO561B_10-25	63	40016	4_SWRN_CO564_25-50	102	90001	9_BANA_CO565B_0-5
25	10025	1_FESP_CO561B_25-50	64	40017	4_SWRN_CO564_50-9999	103	90002	9_BANA_CO565B_50-9999
26	20001	2_MESQ_CO562_25-50	65	50001	5_MESQ_CO567A_0-5	104	90003	9_BANA_CO565B_25-50
27	20002	2_MESQ_CO562_50-9999	66	50002	5_MESQ_CO567A_50-9999	105	90004	9_BANA_CO566C_10-25
28	20003	2_PINE_CO562_25-50	67	50003	5_MESQ_CO567A_25-50	106	90005	9_BANA_CO566C_25-50
29	20004	2_PINE_CO562_50-9999	68	50004	5_PINE_CO567A_50-9999	107	90006	9_BANA_CO566C_50-9999
30	20005	2_PAST_CO562_0-5	69	50005	5_PINE_CO567A_25-50	108	90007	9_BANA_CO566C_0-5
31	20006	2_PAST_CO562_50-9999	70	50006	5_RNGB_CO567A_50-9999	109	90008	9_RYEG_CO565B_50-9999
32	20007	2_PAST_CO562_25-50	71	50007	5_RNGB_CO567A_25-50	110	90009	9_RYEG_CO566C_50-9999
33	20008	2_FRST_CO562_50-9999	72	50008	5_RNGB_CO567A_0-5	111	100001	10_FRST_CO566C_50-9999
34	20009	2_FRST_CO562_25-50	73	50009	5_RNGB_CO567B_50-9999	112	100002	10_FRST_CO566C_25-50
35	20010	2_RYEG_CO562_25-50	74	50010	5_RNGB_CO567B_25-50	113	100003	10_RYEG_CO566C_0-5
36	20011	2_RYEG_CO562_50-9999	75	50011	5_FRST_CO567A_25-50	114	100004	10_RYEG_CO566C_50-9999
37	20012	2_FESP_CO562_50-9999	76	50012	5_FRST_CO567A_50-9999	115	100005	10_RYEG_CO566C_25-50
38	20013	2_FESP_CO562_25-50	77	50013	5_FRST_CO567A_0-5	116	110001	11_RNGB_CO566C_25-50
39	30001	3_MESQ_CO563_25-50	78	50014	5_RYEG_CO567B_0-5	117	110002	11_RNGB_CO566C_50-9999

Tabla 34. Unidades de respuesta hidrológica

Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT.

No	HRUGIS	HRU	No	HRUGIS	HRU
118	110003	11_FRST_CO566C_50-9999	157	130012	13_ORCD_CO569_25-50
119	110004	11_FRST_CO566C_25-50	158	130013	13_PAST_CO568_25-50
120	110005	11_RYEG_CO566B_25-50	159	130014	13_PAST_CO568_50-9999
121	110006	11_RYEG_CO566B_50-9999	160	130015	13_PAST_CO569_50-9999
122	110007	11_RYEG_CO566C_50-9999	161	130016	13_PAST_CO569_25-50
123	110008	11_RYEG_CO566C_25-50	162	130017	13_RNGB_CO568_50-9999
124	120001	12_MESQ_CO566A_25-50	163	130018	13_RNGB_CO568_25-50
125	120002	12_MESQ_CO566A_0-5	164	130019	13_FRST_CO568_50-9999
126	120003	12_MESQ_CO566A_50-9999	165	130020	13_FRST_CO568_25-50
127	120004	12_MESQ_CO566A_10-25	166	130021	13_FRST_CO569_50-9999
128	120005	12_RNGB_CO566A_10-25	167	130022	13_FRST_CO569_25-50
129	120006	12_RNGB_CO566A_25-50	168	130023	13_FRST_CO569_0-5
130	120007	12_RNGB_CO566A_0-5	169	130024	13_BANA_CO568_50-9999
131	120008	12_RNGB_CO566A_50-9999	170	130025	13_BANA_CO568_0-5
132	120009	12_FRST_CO566A_50-9999	171	130026	13_BANA_CO569_25-50
133	120010	12_FRST_CO566A_10-25	172	130027	13_BANA_CO569_50-9999
134	120011	12_FRST_CO566A_0-5	173	130028	13_RYEG_CO568_25-50
135	120012	12_FRST_CO566A_25-50	174	130029	13_RYEG_CO568_0-5
136	120013	12_FRST_CO566B_50-9999	175	130030	13_RYEG_CO568_50-9999
137	120014	12_FRST_CO566B_25-50	176	140001	14_MESQ_CO566B_25-50
138	120015	12_SPAS_CO566A_25-50	177	140002	14_MESQ_CO566B_10-25
139	120016	12_SPAS_CO566A_10-25	178	140003	14_PINE_CO566B_25-50
140	120017	12_SPAS_CO566A_0-5	179	140004	14_PINE_CO566B_50-9999
141	120018	12_RYEG_CO566A_25-50	180	140005	14_FRST_CO566B_50-9999
142	120019	12_RYEG_CO566A_50-9999	181	140006	14_FRST_CO566B_25-50
143	120020	12_RYEG_CO566B_50-9999	182	140007	14_RYEG_CO566B_25-50
144	120021	12_RYEG_CO566B_25-50	183	140008	14_RYEG_CO566B_50-9999
145	120022	12_FESP_CO566A_25-50			
146	130001	13_MESQ_CO568_0-5			
147	130002	13_MESQ_CO568_50-9999			
148	130003	13_MESQ_CO568_25-50			
149	130004	13_MESQ_CO569_25-50			
150	130005	13_MESQ_CO569_50-9999			
151	130006	13_COFF_CO569_0-5			
152	130007	13_COFF_CO569_25-50			
153	130008	13_COFF_CO569_50-9999			
154	130009	13_ORCD_CO568_50-9999			
155	130010	13_ORCD_CO568_25-50			
156	130011	13_ORCD_CO569_50-9999			

Tabla 35. Unidades de respuesta hidrológica

Anexo 3: Área de uso de suelos por subcuencas para cada modelación.

SUBBASIN	Áreas por Uso de suelos (Ha) mapa 5														TOTAL
	MESQ	PINE	COFF	ORCD	PAST	RNGB	FRST	BANA	SPAS	RYEG	FESP	URBN	SWRN	BARR	
1	787.52	5.58			937.44	248.09	463.86	8.19	34.64		306.19				2791.5
2	133.27	133.92			431.27		103.42				61.58	101.33		1.92	966.7
3	135.81	28.09			29.73	5.72	476.5				282.83		9.95	177.92	1146.56
4	803.95	112.89					82.45				53.3		139.61		1192.2
5	245.08	235.47			79.83	716.36	1005.81	14.89			589.36				2886.8
6	174.53	37.44		35.72	319.08	19.92	153.41				316.17		708.44		1764.7
7	18.66				1.05			5.3			231.05				256.05
8						15.48		0.48			6.64				22.61
9						0.55		8.81			37.81				47.17
10							7.81	0.31			129.02				137.14
11	1.58					137.8	57.31				424.34				621.03
12	825.53	69.55			0.08	400.73	415.48		275.36	227.66	0.63				2215.02
13	235.47	131.11	222.06	361.03	431.88	382.83	793.52	185.38			622.61				3365.88
14	139.83	204.22			44.89	16.3	843.17		60.13	173.41					1481.94
TOTAL	3501.22	958.27	222.06	396.75	2275.23	1943.78	4402.75	223.36	370.13	3102.47	461.44	9.95	1025.97	1.92	18895.3
%LandUsed	18.53%	5.07%	1.18%	2.10%	12.04%	10.29%	23.30%	1.18%	1.96%	16.42%	2.44%	0.05%	5.43%	0.01%	100.00%

Tabla 36. Áreas de uso de suelos del Mapa 5.

SUBBASIN	Áreas por Uso de suelos (Ha) para ESCENARIO 1 y 2														TOTAL
	MESQ	PINE	COFF	ORCD	PAST	RNGB	FRST	BANA	SPAS	RYEG	FESP	URBN	SWRN	BARR	
1	803.16				956.05	253.02	473.07				306.18				2791.49
2	133.56	134.22			432.22		103.65				61.72	101.33			966.70
3	145.12						509.14				302.20		190.11		1146.56
4	803.95	112.89					82.45				53.30		139.61		1192.20
5	253.39	243.46				740.67	1039.93				609.34				2886.79
6	184.25				336.84		161.95				333.77		747.89		1764.70
7	19.13										236.92				256.05
8						15.82					6.79				22.61
9								8.92			38.26				47.17
10							7.83				129.31				137.14
11						138.15	57.46				425.43				621.04
12	852.32					413.75	428.97		284.30	235.05	0.63				2215.01
13	245.02		231.06	375.67	449.38	398.34	825.68	192.89			647.84				3365.87
14	152.30	222.43					918.35				188.87				1481.94
TOTAL	3592.19	713.00	231.06	375.67	2174.49	1959.75	4608.49	201.81	284.30	3215.48	461.43	0.00	1077.60	0.00	18895.26
%LandUsed	19.01%	3.77%	1.22%	1.99%	11.51%	10.37%	24.39%	1.07%	1.50%	17.02%	2.44%	0.00%	5.70%	0.00%	100.00%

Tabla 37. Áreas de uso de suelos escenario 1 y 2.

SUBBASIN	Áreas por Uso de suelos (Ha) ESCENARIO 3 y 4-USO-100%														TOTAL
	MESQ	PINE	COFF	ORCD	PAST	RNGB	FRST	BANA	SPAS	RYEG	FESP	URBN	SWRN	BARR	
1	1846.14				166.20	0.11	473.07				306.18				2791.71
2	577.22	134.22			50.30		103.65				0.02	101.33			966.74
3	637.42						509.14				0.02		0.02		1146.61
4	943.56	112.89					82.45				53.30		0.02		1192.22
5	796.17	243.45				197.98	1039.94				609.35				2886.88
6	1602.71				0.04		161.95				0.04		0.04		1764.76
7	256.05										0.01				256.06
8						21.12					1.49				22.61
9								8.92			38.26				47.17
10							7.83				129.31				137.14
11						458.78	57.46				104.80				621.04
12	1550.37					98.41	428.97		0.07	136.77	0.62				2215.21
13	1092.74		363.63	375.67	0.13	0.07	825.69	60.39			647.84				3366.16
14	152.30	222.43					918.35				188.87				1481.94
TOTAL	9454.68	712.99	363.63	375.67	216.68	776.47	4608.51	69.31	0.07	1856.76	461.43	0.00	0.08	0.00	18896.27
%LandUsed	50.03%	3.77%	1.92%	1.99%	1.15%	4.11%	24.39%	0.37%	0.00%	9.83%	2.44%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%

Tabla 38. Áreas de uso de suelos escenario 3 y 4 – uso 100%.

Estimación de la producción hídrica para la cuenca del río Tona mediante el modelo hidrológico semidistribuido SWAT.

SUBBASIN	Áreas por Uso de suelos (Ha) ESCENARIO 3 y 4-USO-50%														TOTAL
	MESQ	PINE	COFF	ORCD	PAST	RNGB	FRST	BANA	SPAS	RYEG	FESP	URBN	SWRN	BARR	
1	1324.65				561.08	126.51	473.07				306.18				2791.5
2	355.39	134.22			241.25		103.65				30.86	101.33			966.7
3	391.27						509.14				151.1		95.06		1146.57
4	873.76	112.89					82.45				53.3		69.8		1192.2
5	524.78	243.45				469.28	1039.94				609.35				2886.8
6	893.5				168.42		161.95				166.89		373.94		1764.7
7	137.59										118.46				256.05
8						18.47					4.14				22.61
9								8.92			38.26				47.17
10							7.83				129.31				137.14
11						298.47	57.46				265.11				621.04
12	1201.36					256.04	428.97		142.15		185.88	0.62			2215.03
13	668.87		297.35	375.67	224.69	199.18	825.69	126.6			647.84				3365.88
14	152.3	222.43					918.35				188.87				1481.94
TOTAL	6523.47	712.99	297.35	375.67	1195.44	1367.95	4608.51	135.52	142.15	2536.05	461.43	0	538.8	0	18895.32
%LandUsed	34.52%	3.77%	1.57%	1.99%	6.33%	7.24%	24.39%	0.72%	0.75%	13.42%	2.44%	0.00%	2.85%	0.00%	100.00%

Tabla 39. Áreas de uso de suelos escenario 3 y 4 – uso 50%.

SUBBASIN	Áreas por Uso de suelos (Ha) ESCENARIO 5 y 6-USO-100%														TOTAL
	MESQ	PINE	COFF	ORCD	PAST	RNGB	FRST	BANA	SPAS	RYEG	FESP	URBN	SWRN	BARR	
1	803.16				166.20	0.11	1516.06				306.18				2791.72
2	133.56	134.22			50.30		547.31				0.02	101.33			966.74
3	145.12						1001.45				0.02		0.02		1146.61
4	803.95	112.89					222.06				53.30		0.02		1192.22
5	253.40	243.45				197.98	1582.71				609.35				2886.88
6	184.25				0.04		1580.43				0.04		0.04		1764.79
7	256.05										0.01				256.06
8						21.12					1.49				22.61
9								8.92			38.26				47.17
10							7.83				129.31				137.14
11						138.15	378.10				104.80				621.05
12	852.33					0.09	1362.06		0.07		0.09	0.62			2215.26
13	245.02		231.06	375.67	0.13	0.07	2434.05	8.30			72.00				3366.30
14	152.30	222.43					1107.22				0.03				1481.98
TOTAL	3829.13	712.99	231.06	375.67	216.68	357.52	11739.28	17.22	0.07	955.41	461.43	0.00	0.08	0.00	18896.53
%LandUsed	20.26%	3.77%	1.22%	1.99%	1.15%	1.89%	62.12%	0.09%	0.00%	5.06%	2.44%	0.00%	0.00%	0.00%	100.00%

Tabla 40. Áreas de uso de suelos escenario 5 y 6 – uso 100%.

SUBBASIN	Áreas por Uso de suelos (Ha) ESCENARIO 5 y 6-USO-50%														TOTAL
	MESQ	PINE	COFF	ORCD	PAST	RNGB	FRST	BANA	SPAS	RYEG	FESP	URBN	SWRN	BARR	
1	803.16				561.08	126.51	994.57				306.18				2791.49
2	133.56	134.22			241.25		325.48				30.86	101.33			966.70
3	145.12						755.30				151.10		95.06		1146.57
4	803.95	112.89					152.26				53.30		69.80		1192.20
5	253.40	243.45				469.28	1311.32				609.35				2886.79
6	184.25				168.42		871.20				166.89		373.94		1764.70
7	137.59										118.46				256.05
8						18.47					4.14				22.61
9								8.92			38.26				47.17
10							7.83				129.31				137.14
11						138.15	217.78				265.11				621.04
12	852.33					206.88	895.51		142.15		117.52	0.62			2215.01
13	245.02		231.06	375.67	224.69	199.18	1629.84	100.55			359.89				3365.88
14	152.30	222.43					1012.78				94.43				1481.94
TOTAL	3710.66	712.99	231.06	375.67	1195.44	1158.47	8173.86	109.46	142.15	2085.32	461.43	0.00	538.80	0.00	18895.30
%LandUsed	19.64%	3.77%	1.22%	1.99%	6.33%	6.13%	43.26%	0.58%	0.75%	11.04%	2.44%	0.00%	2.85%	0.00%	100.00%

Tabla 41. Áreas de uso de suelos escenario 5 y 6 – uso 50%.