

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA

*Modelación hidrológica en las cuencas San Jerónimo-Piedras, Río Blanco y
Tenorio usando SWAT*

Trabajo Final de Graduación
para obtener el grado de Licenciatura en Ingeniería Agrícola

Alejandra Barquero Ureña

Mayo, 2015

Esta tesis fue presentada el 2015 como requisito fundamental para optar por el Grado Licenciatura en Ingeniería Agrícola. Fue aprobada por el Tribunal Examinador constituido por las siguientes personas:



Ing. Henry Alfaro Chavarría, M.Sc.
Presidente del Tribunal



Ing. Alejandra Rojas González, Ph.D.
Directora de la tesis



Ing. Georges Govaere Vicarioli, Ph.D.
Asesor



Ing. José María Alfaro Quesada
Asesor



Ing. Matías Chaves Herrera
Miembro lector



Alejandra Barquero Ureña
Sustentante

*A mi hija Meli, quien llenó mi espíritu de perseverancia y le dio motor a los sueños que
construí el día que nació.*

*A mi abuelita, quien llenó mi alma del amor más puro y me recibió por tantos años en su
cálido regazo.*

A don Miguel Gómez Barrantes, quien llenó mi mente con ideas de grandeza.

Agradecimientos

Agradecida con Dios, por ponerme en este camino.

A mis papás, Virginia Ureña Quirós y Guillermo Barquero Cruz que siempre se encontraban detrás de todos mis logros, por la confianza y apoyo y por no soltar mi mano desde el día en que me dieron la vida.

A mis amigos que me alentaron y dieron sus consejos para poder concluir el proyecto, pero en especial a mi amigo y colega Manuel Pérez, por sus consejos, ayuda y compañía en momentos decisivos.

Al personal de la escuela de Ingeniería Agrícola, por la sonrisa siempre amable con que me ayudaron en cada etapa. A profesores que con su gran vocación, inspiraron un fuerte amor por la carrera, que mantengo hasta el día de hoy. A la profesora Alejandra Rojas por su guía y gran entusiasmo con que me contagiaron en cada etapa del proyecto, y por abrirme las puertas a tantos nuevos conocimientos. A Raúl Barrios, por toda su paciencia, compañía y apoyo de largas horas de trabajo.

Al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) y al Instituto Meteorológico Nacional (IMN) por la colaboración con los datos brindados.

A Dangelo Sandoval del Centro de Investigación Agronómica (CIA), por su colaboración amable y desinteresada.

Cada persona que me acompañó en un pequeño tramo o en la totalidad del camino, de tantos años de grandes esfuerzos, alentaron mi seguir adelante, me abrazaron en los triunfos, limpiaron las lágrimas de las derrotas y sonrían al verme llegar a la meta, me siento profundamente agradecida por que Dios los puso en mi vida.

RESUMEN

Se realiza una modelación hidrológica en las subcuencas Río Piedras-San Gerónimo, Río Blanco y Río Tenorio las cuales conforman parte de la cuenca Bebedero, por medio del modelo SWAT. El estudio tiene como finalidad evaluar el modelo y su adaptación a condiciones de nuestro país.

Se cuenta con datos de dos estaciones limnigráficas con las cuales se realiza la comparación de datos entre la simulación y los datos observados. La primera estación llamada Rancho Horizontes incluye las subcuencas de Río Piedras-San Gerónimo y Río Blanco (cuenca 1). La segunda, Rancho Rey, incluye la subcuenca de Río Tenorio (cuenca 2).

Se realizan tres simulaciones, con las estaciones Bagaces, Hacienda Guachipelín y La Fortuna las que se dan en la cuenca 1, y una simulación con la estación de Río Naranjo en la cuenca 2.

Se precalibra el modelo, variando los valores de conductividad hidráulica, aumentándola un 300% debido a la alta infiltración de los suelos de la zona, esto disminuyó los picos de lluvia. También se aumenta la fracción de percolación profunda (RCHRG_DP) lo que colabora para estabilizar los caudales mínimos. El valor del retraso de llegada de aguas subterráneas (GW_DELAY) se ajusta en 500 días, valor que ajusta el tiempo de distribución de los caudales. Se modifican los valores de evaporación (ESCO) y coeficiente de re-evaporación (GW_REVAP) para disminuir el agua en el suelo.

Realizada la simulación para la estación Bagaces se obtiene un coeficiente de Nash de 0,01, debido a la poca precipitación que reporta esta estación localizada en la zona media de la cuenca 1. El coeficiente de Nash en la estación de Hacienda Guachipelín es de -0.58, el valor menos representativo, ya que la estación solo abarca 2,70% de la cuenca según los polígonos de Thyssen. Finalmente para la cuenca 1 se reporta un coeficiente de Nash de 0,31 cuando se incluyen los datos de la estación La Fortuna, esto debido a la alta concentración de precipitación que se da en la zona.

Se realizan dos escenarios en la cuenca 1 utilizando los datos de la estación meteorológica La Fortuna, proponiendo condiciones para el año 2025. El primero consiste en un cambio de cobertura disminuyendo el área boscosa, lo que aumenta los caudales en hasta 7,8 m³/s en promedio anual. El segundo escenario se da bajo cambio de condiciones climáticas, aumentando la temperatura en un orden de 0,45°C y disminuyendo la precipitación en un 10 %, situación que disminuye los caudales de la cuenca en hasta 16,64%.

INDICE

RESUMEN	iv
Índice de Tablas	vii
Índice de Figuras	viii
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 ESTUDIOS EN LA ZONA	3
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	4
1.3 OBJETIVOS QUE JUSTIFICAN LA INVESTIGACIÓN	5
1.3.1 <i>Objetivo general</i>	5
1.3.2 <i>Objetivos específicos</i>	5
Capítulo 2. Marco teórico.....	7
2.1 SIMULACIÓN HIDROLÓGICA	9
2.2 SWAT	11
2.3 DATOS CLIMÁTICOS	15
2.3.1 <i>Infiltración y escorrentía</i>	16
2.3.2 <i>Distribución del número de curva SCS</i>	16
2.3.3 <i>Método de infiltración Green & Ampt</i>	20
2.3.4 <i>Tiempo de concentración</i>	20
2.3.5 <i>Fórmula racional del SWAT</i>	22
2.3.6 <i>Evapotranspiración</i>	23
2.3.7 <i>Evapotranspiración actual</i>	26
2.3.8 <i>Agua subterránea</i>	29
2.3.9 <i>Infiltración</i>	30
2.4 CALIBRACIÓN HIDROLÓGICA	31
Capítulo 3. Descripción de la Zona de estudio	35
3.1 ASPECTOS CLIMÁTICOS	37
3.2 CARACTERÍSTICAS EDAFOLÓGICAS	38
3.3 DRAT	39
Capítulo 4. Metodología.....	41

4.1	INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA	41
4.2	INFORMACIÓN DE USO DE SUELO	41
4.3	CAPA DE TIPO DE SUELO	42
4.4	OBTENCIÓN DE DATOS	43
4.5	USO DEL SWAT	45
4.6	PRE-CALIBRACIÓN	48
4.7	MODELACIÓN DE ESCENARIOS.	49
Capítulo 5. Resultados y análisis		52
5.1	DELIMITACIÓN DE LA CUENCA	52
5.2	USO DE SUELO	53
5.3	SUELOS	55
	5.3.1 Características generales de la cuenca 1	57
	5.3.2 Características generales de la cuenca 2	60
5.4	PRE CALIBRACIÓN CUENCA 1	63
	5.4.1 Tabla de apoyo para relleno de datos meteorológicos	66
5.5	MODELACIÓN HIDROLÓGICA CUENCA 1	67
	5.5.1 Bagaces	69
	5.5.2 Hacienda Guachipelín	72
	5.5.3 La Fortuna	74
5.6	MODELACIÓN HIDROLÓGICA CUENCA 2.	78
	5.6.1 Río Naranjo	78
5.7	ESCENARIOS	82
	5.7.1 Escenario 1: Cambio de cobertura del suelo	82
	5.7.2 Escenario 2: Calentamiento Global	86
Capítulo 6. Conclusiones y recomendaciones		91
6.1	CONCLUSIONES	91
6.2	RECOMENDACIONES	92
Capítulo 7. Bibliografía		94
ANEXO 1. Calibración de conductividad hidráulica.		97
ANEXO 2. Datos de entrada para simulación de cuenca 1.		99

ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 2.1. Clasificación de clases antecedentes de humedad (AMC) para el método de abstracciones de lluvia del SCS. (Chow et al., 1994)</i>	<i>17</i>
<i>Tabla 2.2. Contenido de agua para suelos con diversas condiciones de humedad</i>	<i>30</i>
<i>Tabla 2.3. Calibración en SWAT reportada en 64 estudios</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 2.4. Parámetros sensibles sobre la calibración de SWAT.</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 3.1. Estaciones del ICE en las cuencas en estudio</i>	<i>37</i>
<i>Tabla 3.2. Concesiones superficiales con mayor volumen en la cuenca de Bebedero.</i>	<i>39</i>
<i>Tabla 4.1. Fuente de datos para el tipo de suelo.</i>	<i>42</i>
<i>Tabla 4.2. Estaciones del ICE.....</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 4.3. Número de curva inicial asignado por la base de datos de SWAT.....</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 4.4. Escenario de cambio de cobertura del suelo</i>	<i>50</i>
<i>Tabla 5.1. Área de las cuencas según la base de datos y SWAT.</i>	<i>52</i>
<i>Tabla 5.2. Uso de suelo asignado en SWAT.</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 5.3. Orden de suelos presente en la cuenca 1 y 2.....</i>	<i>56</i>
<i>Tabla 5.4. Uso de suelo en la cuenca 1.</i>	<i>57</i>
<i>Tabla 5.5. Características de las subcuencas dentro de la cuenca 1.</i>	<i>58</i>
<i>Tabla 5.6. Datos del canal de cada subcuenca.</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 5.7. Uso de suelo en la cuenca 2.</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 5.8. Características de las subcuencas dentro de la cuenca 2.</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 5.9. Datos del canal de cada subcuenca.</i>	<i>62</i>
<i>Tabla 5.10. Datos calibrados en SWAT.</i>	<i>65</i>
<i>Tabla 5.11. Valores de rugosidad de los suelos de la cuenca.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabla 5.12. Datos de apoyo insertados al modelo SWAT.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabla 5.13. Acumulado de lluvia anual para todas las estaciones (mm)</i>	<i>69</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 2.1. Ciclo hidrológico. Fuente: Centro Virtual de Información del Agua, 2004</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2.2. Diagrama sistema hidrológico. Fuente: Chow et al., 1994</i>	<i>9</i>
<i>Figura 2.3. Usos de SWAT en Costa Rica.</i>	<i>13</i>
<i>Figura 2.4. Evaporación producida con distintos valores esco (Neitsch, et al., 2009)</i>	<i>28</i>
<i>Figura 2.5. Diagrama de calibración de SWAT. Fuente: Engel et al., 2007</i>	<i>33</i>
<i>Figura 3.1. Subcuencas en estudio.</i>	<i>36</i>
<i>Figura 3.2. Orden de suelos en subcuencas en estudio.</i>	<i>38</i>
<i>Figura 4.1. Estaciones utilizadas para el estudio.</i>	<i>44</i>
<i>Figura 5.1. Cuencas en estudio delimitadas por SWAT.</i>	<i>53</i>
<i>Figura 5.2. Uso de suelo de subcuencas en estudio, enero, 2014.</i>	<i>55</i>
<i>Figura 5.3. Orden de suelos presente en la cuenca.</i>	<i>56</i>
<i>Figura 5.4. Subcuencas y ríos dentro de la cuenca 1.</i>	<i>58</i>
<i>Figura 5.5. Subcuencas y ríos dentro de la cuenca 2.</i>	<i>61</i>
<i>Figura 5.6. Hidrograma de Cuenca 1 con precipitación reportada en la Fortuna con datos iniciales.</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5.7. Área de influencia de cada estación meteorológica.</i>	<i>68</i>
<i>Figura 5.8. Modelación hidrológica según SWAT de la estación Bagaces.</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5.9. Hidrograma de Cuenca 1 con precipitación reportada en Bagaces.</i>	<i>71</i>
<i>Figura 5.10. Modelación hidrológica según SWAT de la estación Hacienda Guachipelín.</i>	<i>72</i>
<i>Figura 5.11. Hidrograma de Cuenca 1 con precipitación reportada en Hacienda Guachipelín.</i>	<i>73</i>
<i>Figura 5.12. Modelación hidrológica según SWAT de la estación La Fortuna.</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5.13. Hidrograma de Cuenca 1 con precipitación reportada en Bagaces.</i>	<i>75</i>
<i>Figura 5.14. Modelación hidrológica según SWAT de la estación Río Naranjo.</i>	<i>79</i>
<i>Figura 5.15. Hidrograma de Cuenca 1 con precipitación reportada en Río Naranjo.</i>	<i>80</i>
<i>Figura 5.16. Modelación de Cuenca 1 aplicando cambio de cobertura a lo largo de 6 años.</i>	<i>83</i>
<i>Figura 5.17. Modelación de Cuenca 1 aplicando un aumento de temperatura de 0,45 °C.</i>	<i>87</i>

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Cada vez, con mayor frecuencia, el país busca como cuidar sus recursos hídricos, de manera que se pueda disponer de él para las necesidades humanas, como la generación de energía eléctrica, el riego de los productos de consumo humano, la higiene básica, consumo directo del líquido, transporte, etc. Sin embargo, es hasta ahora donde se busca la solución a una situación que se viene dando hace cinco décadas.

A lo largo de estos años no se han planteado políticas hídricas integrales, claras y estables y esto ha dado pie al uso ineficiente y a la contaminación de gran cantidad de agua. Se enfrentan otro tipo de situaciones que incrementan la problemática como lo son la planificación a corto plazo, el dominio de gran cantidad de agua en pocas manos y la poca experiencia en materia de administración de aguas (Segura, 2002).

Según destaca el Dr. Carlos Fernández Jauregui, en el reportaje de la Universidad de Costa Rica “Experto en aguas visita Costa Rica”, el 90% del agua de riego se pierde debido a tecnologías obsoletas, y 75% del agua aprovechable a nivel mundial es utilizada para este fin. Sin embargo gran parte de la problemática se encuentra en la gobernabilidad, ya que no existe una autoridad de aguas y diversos ministerios están involucrados en la administración de tan preciado recurso (O’neal, 2013). Todas estas situaciones nos llevan a valorar más el recurso del agua, y a utilizar las últimas tecnologías para crear sistemas eficientes donde no se desperdicie.

En el marco de toda esta situación se encuentra la cuenca más grande del país y que tiene gran importancia en la zona de Guanacaste debido a los beneficios que presenta a los habitantes de la zona, se trata de la cuenca del Tempisque-Bebedero. Esta se encuentra conformada por dos sub cuencas la del Tempisque y Bebedero, juntas forman un área de 5 404,6 km² (Organización para estudios Tropicales, 2001).

Dentro de la cuenca se encuentra el principal proyecto de riego, el Distrito de Riego Arenal Tempisque (DRAT), el cual cobra vida a mediados de los años 70 y aprovecha aproximadamente 46 m³/s del embalse del Arenal. El proyecto se subdivide en el canal Sur con una longitud de 8,5 km en el tramo I y un área regable de 8 121 ha y el canal Oeste el que cuenta con una longitud de 40 km y un área regable de 19 344 ha, construidos con un caudal de diseño de 30 m³/s y 55 m³/s,

respectivamente. Actualmente se encuentra en construcción el tramo II del canal sur, con capacidad de 15 m³/s y habilitará un área de riego de 7 520 ha.

La mayor problemática que se presenta en la zona es la escasez de agua en época seca y las inundaciones en la época lluviosa. Esta situación se da por que en los meses de diciembre a marzo, en la época seca, llueve un 4% de la lluvia total de la región, mientras que los meses restantes llueve el otro 96% (Leitón, 2011). Estas sequías en conjunto con el excesivo uso del recurso hídrico de la zona, agravan la situación.

Según el documento de la OET (2001), se estima que en concesiones se brinda un caudal de 12,26 m³/s a la cuenca del Tempisque, esto sin tomar en cuenta la extracción ilegal que se da como un hecho en la zona. De estas concesiones, se encuentra el 41% en manos de Central Azucarera Tempisque S.A. y otra gran parte en la Azucarera el Viejo S.A. Con solo estos datos, que son parte de la situación existente, se observa el motivo de la escasez de agua en los meses más secos.

No se debe olvidar que en la cuenca se presentan también grandes problemas de contaminación por los agroquímicos utilizados en las plantaciones los cuales drenan al Parque Nacional Palo Verde, y también se cuenta con un problema de sedimentación, situación que provoca la degradación de la calidad del agua.

Es evidente la necesidad que existe en la zona, de una buena planificación en conjunto con una buena legislación de aguas e instituciones que velen por su correcto cumplimiento. Además que se observa la necesidad de una actualización de datos, ya que los encontrados en los documentos sobre los caudales de la cuenca, las concesiones de agua, el uso de suelos, y otros datos necesarios para realizar una optimización del DRAT, son desiguales y desactualizados.

Para esta labor, se cuenta con una gran herramienta tecnológica, que muestra de manera detallada sus datos de salida, el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. El programa predice el impacto de las prácticas de manejo del suelo para calcular la cantidad de agua, sedimentos y movimiento de sustancias agrícolas químicas; estos análisis los realizan en un modelo continuo de tiempo, es decir, no está diseñado para simular un solo acontecimiento de flujo detallado.

El programa utiliza como datos de entrada información específica sobre el clima y tiempo, propiedades de suelos, topografía, vegetación y práctica de manejo de tierra, y realiza una

modelación sobre el movimiento del agua, movimiento de sedimento, desarrollo de cosecha, ciclo de nutrientes, etc. (Uribe, 2010).

Por sus características para realizar modelos hidrológicos, es que este programa resulta confiable para el estudio de una cuenca con problemas tan importantes como ésta. Asimismo el SWAT representa una novedad en el manejo de programas de simulación hidrológica, ya que nunca ha sido utilizado para realizar un estudio similar en la zona. Esto podría ser un beneficio, para observar los resultados desde otro punto de vista, tomando en cuenta los estándares que utiliza el SWAT.

1.1 ESTUDIOS EN LA ZONA

La cuenca del Tempisque-Bebedero en sí, por el hecho de ser la cuenca más grande del país y las consecuencias que tiene sobre áreas protegidas de gran interés para el país como lo es Palo Verde, se han realizado gran cantidad de estudios. En este tipo de escritos, se investiga sobre caudales ecológicos, efectos ambientales, cambio de cobertura, por mencionar algunos ejemplos. Entre éstos podemos citar los realizados por Romero Fernández (2003) sobre los efectos ambientales en los humedales del Parque Nacional Palo Verde por los volúmenes de agua generados por excedentes de riego del Distrito de Riego Arenal, Votano et al. (2004) con un estudio hidrometeorológico de la cuenca del río Tempisque y el de Cordero et al. (2008) con el análisis de cambio de la cobertura en el Área de Conservación Tempisque.

Posterior al año 2010 se continúa con investigaciones en la zona, pero cada vez más orientadas a la ecología, ya que el gasto es superior al recurso hídrico disponible, como se anunciaba en décadas posteriores, no ha cesado, por lo que se agota rápidamente sin una solución a la vista, además de producir grandes residuos de agua contaminada con químicos, los cuales producen mayor daño ambiental en la zona.

Por otro lado también se han realizado estudios del Distrito de Riego Arenal Tempisque, el que se ha caracterizado por ser uno de los principales proyectos de riego del país por varios motivos, uno de ellos es la ambiciosa meta que sigue hace más de 40 años y el cambio que ha presentado en la zona para sus habitantes. Es por este motivo que desde los años noventa se han realizado varios estudios con el fin de evaluar diversas variables del proyecto de riego y así realizar algunas propuestas para su mejoramiento. Es así como surgen estudios como el de Consultoría Agroindustrial (CAI) (1996), con una actualización del plan estratégico de integración de servicios. Suárez (1999) del MAG realizó otra

evaluación, en la cual arroja información negativa respecto al proyecto de riego, resaltando, sobre todo, las malas políticas de las instituciones encargadas.

Para la siguiente década la preocupación por el proyecto y por las consecuencias que éste provoca, incentiva la investigación tanto del DRAT como de la cuenca del Tempisque. Se publican varias tesis a nivel de ingeniería y recursos naturales en universidades estatales. Es así como Madrigal (2003) realiza un diagnóstico del funcionamiento del DRAT, donde además se estudió la principal problemática que tenía el proyecto en ese tiempo, el uso desmedido del recurso del agua. Se menciona en varias ocasiones la gran problemática y poco desarrollo con que cuenta el proyecto, a pesar de tener tres décadas en funcionamiento para este momento. Esta tesis es una de las más completas encontradas hasta ahora, en base al tema del Distrito de Riego, ya que retoma varios aspectos como el cultural, económico y ambiental, para realizar, detalladamente, un diagnóstico del proyecto. Su mayor aporte es la propuesta de un cambio de tarifa, ya que el existente presenta pérdidas para el proyecto y no permite que sea rentable, siendo necesario el subsidio del estado. Se muestran las mayores debilidades del Proyecto de Riego Arenal Tempisque, donde la mayor preocupación es la poca conciencia sobre la utilización del agua.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La cuenca Tempisque-Bebedero representa una de las zonas del país con mayores necesidades del recurso hídrico, debido al gran desarrollo que se ha obtenido en campos como la agricultura, la ganadería y el turismo. Esta cuenca se encuentra conformada por las sub cuencas del Tempisque y la de Bebedero, y se encuentra dividida en dos zonas, la cuenca alta y la baja. En la parte alta se encuentran cultivos como café, pastos y hortalizas, y en la cuenca baja sandía, y en mucha mayor parte arroz (10 350 ha), caña de azúcar (12 500 ha) y melón (5300 ha) (Bach, 2007; SENARA, 2008).

Esta cuenca resulta de vital importancia para estas actividades agrícolas, ya que los cultivos son regados por el proyecto del Distrito de Riego Arenal Tempisque (DRAT) que toma el agua del embalse del Arenal dentro de la cuenca y utiliza un 72 % del agua para este fin.

Sin embargo la cuenca presenta déficit de agua en cinco meses críticos de época seca, ya que la demanda es superior al volumen generado por precipitaciones de 50 mm mensual, y al recibido de los canales derivados de la presa Sandillal. Esta situación se puede deber a que se tiene concesionado un volumen de agua superficial de 12,26 m³/s, y 55% de esta agua se distribuye en

cuatro usuarios del sistema de los setenta y siete registrados. La demanda de agua no podría ser satisfecha si la cuenca del Río Arenal no exportara parte de su líquido (Banco Interamericano de Desarrollo, 2008).

Toda esta situación solo representa parte de la problemática sobre la cuenca de mayor extensión del país, ya que se han identificado otras situaciones que requieren de medidas, como lo son las inundaciones en la época de lluvia debido a problemas de drenaje, la impermeabilidad de sus suelos, la topografía plana-cóncava y la construcción de diques. (Votano, Parham, & Hall, 2004). Se presenta también una gran carga de sedimentos en los ríos Tempisque y Bebedero que contribuyen con gran cantidad de partículas depositadas en las partes bajas de la cuenca (Bach, 2007).

Frente a esta problemática existe otra mayor, que no permite una solución ágil y eficiente de la situación con el recurso hídrico tan necesario en la zona, y es la poca coordinación entre las principales instituciones encargadas de la administración y manejo del agua en la zona, que son el SENARA, AyA, ARESEP y el MINAE. Estas no tienen bien definidas sus funciones, se encuentran fragmentadas y dispersas respecto a lo que le corresponde a cada una, y esto agrava más la situación ya que no presentan respuestas inmediatas ante situaciones existentes hace muchos años. (Guzmán Arias & Calvo Alvarado, 2012)

1.3 OBJETIVOS QUE JUSTIFICAN LA INVESTIGACIÓN

1.3.1 Objetivo general

Realizar un estudio hidrológico en la cuenca Bebedero, en específico en las sub cuencas Río Piedras San Jerónimo, Río Blanco, Río Tenorio, esto por medio de una modelación y calibración hidrológica con el modelo hidrológico SWAT, para determinar **como muestra, un área que aporta agua a la zona donde se encuentra el Distrito de Riego Arenal Tempisque.**

1.3.2 Objetivos específicos

- i. Realizar una simulación hidrológica continua de las subcuencas Río Piedras-San Jerónimo, Río Blanco y Río Tenorio, por medio de ArcSWAT para estimar los caudales en el área de estudio.

- ii. Calibrar el modelo en la subcuenca Río Piedras, y posteriormente validar los datos de la calibración en la subcuenca Río Tenorio.
- iii. Observar por medio de escenarios el impacto del cambio de uso de suelos y cambio climático en el comportamiento de los caudales de la subcuenca Río Piedras para el año 2025.

Capítulo 2. MARCO TEÓRICO

Con la problemática de escasez hídrica que se presenta en la actualidad, surge la gran necesidad del estudio de su comportamiento con respecto a las necesidades del hombre, para así optimizar su utilización. Es gracias a ciencias como la hidrología donde encontramos las variables necesarias para el estudio de estas necesidades.

Carpena & Rodríguez (2005) definen la hidrología como la ciencia que se encarga de estudiar el comportamiento del agua en la Tierra, sobre todo su distribución y circulación y que se fundamenta sobre todo en el ciclo hidrológico. El U.S. Federal Council for Science and Technology (1962) además agrega que la hidrología también estudia las propiedades físicas y químicas y su influencia sobre el medio ambiente, incluyendo su relación con los seres vivos. Estas definiciones nos llevan a hacer gran énfasis sobre el principal medio por el cual se da la hidrología, el ciclo hidrológico.

El ciclo hidrológico, mostrado en la Figura 2.1, es una sucesión de etapas por las que atraviesa el agua para moverse de la atmósfera a la tierra y viceversa, y así completar las fases de evaporación desde el suelo, mar o aguas continentales, condensación de nubes, precipitación, acumulación en el suelo o masas de agua y re evaporación. (Campos, 1998)



Figura 2.1. Ciclo hidrológico. Fuente: (Centro Virtual de Información del Agua, 2004)

La energía que permite el funcionamiento del ciclo hidrológico se encuentra en dos factores, el sol que evapora el agua, y la gravedad que la hace caer al condensarse. De esta manera y debido al sol, el agua de los océanos y la superficie terrestre es evaporada y transportada entre continentes con ayuda del viento. Una vez que la temperatura desciende llega a condensarse y se forman las nubes, posteriormente la presión de vapor del agua es igual a la presión de vapor de saturación lo que hace que caiga a la tierra en forma de lluvia o nieve, sin embargo una parte se evapora mientras cae y otra es retenida por la vegetación, los edificios, calles, etc. Dentro de la que logra tocar la tierra una parte es escurrida y llega a canales, los cuales se conectan para formar arroyos y éstos a ríos; otro porcentaje del agua se infiltra al suelo y dependiendo de la cantidad, si es mucha pasa a formar parte del agua subterránea y de ser poca, queda en la zona no saturada, donde es evaporada nuevamente o transpirada por las plantas, al ser difícil la cuantificación del agua transpirada y la evaporada, se suelen englobar estos dos fenómenos en lo que llamamos evapotranspiración.

El concepto apropiado para denotar este ciclo y poder obtener una mejor interpretación es el de sistema hidrológico, ya que se compone de un conjunto de procesos. Según Chow et al., (1994) el sistema hidrológico es una estructura o volumen en el espacio, rodeada por una frontera, que acepta agua y otras entradas, opera en ellas internamente y las produce como salidas. Esto es representado como se muestra en la Figura 2.2.

También se entiende este concepto de sistema por tener distintos elementos interconectados entre sí con cierta dependencia, y hay variables de entrada que dan paso a las de salida y así continuar el ciclo recurrentemente. De esta manera se observa cómo se incluyen los procesos antes mencionados de precipitación, evaporación, interceptación y transpiración básicos en el ciclo hidrológico; sin embargo vienen acompañados por otros, que complementan este ciclo, pero sobre todo mejoran o deterioran la calidad del agua.

La mejor representación cuantitativa que se tiene de un sistema hidrológico es la cuenca, ya que como la definición lo indica es un volumen en el espacio rodeada por una frontera, que en este caso sería la divisoria de aguas, mantiene constantemente entradas de agua, opera en ellas distribuyéndolas por diferentes medios y así las conduce a una salida, la cual a pesar de la complejidad o tamaño de la cuenca siempre es la misma.

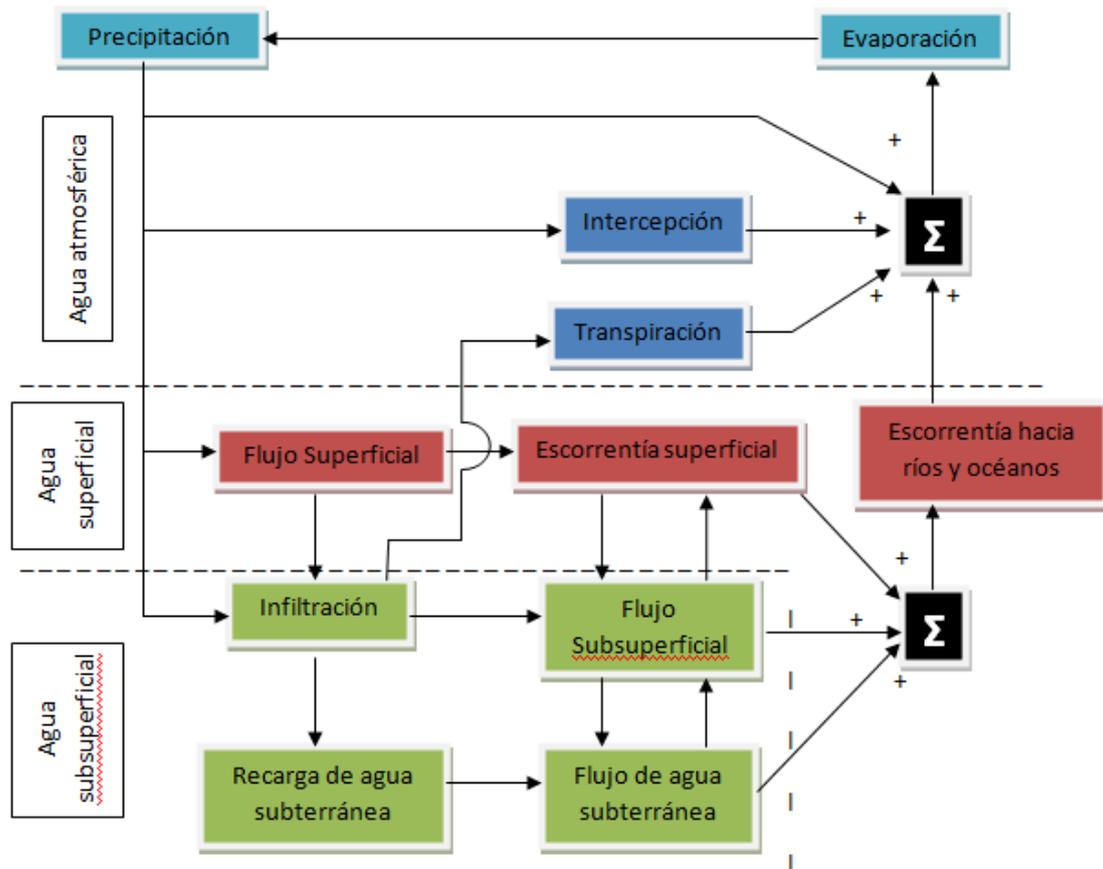


Figura 2.2. Diagrama sistema hidrológico. Fuente: Chow et al., 1994

Ciertamente los sistemas hidrológicos son realmente complejos, y su estudio normalmente hace un estimado de la realidad sin ser exactos, es por este motivo que con el fin de aproximarse a la realidad se realizan modelos matemáticos de simulación tomando en cuenta la mayoría de variables dentro de una cuenca, para así tener mayor precisión sobre cada variable que existe en cada sistema.

2.1 SIMULACIÓN HIDROLÓGICA

Según Parra (2005) la simulación constituye un soporte indispensable para el proceso de construcción del modelo en sus diferentes aproximaciones, ya que aporta imágenes que van indicando al modelador que tan acertado está en la representación matemática de la realidad, por esta razón la simulación es una herramienta para la validación final de un modelo, el análisis de

sensibilidad y en general para la experimentación con propósitos de conocimiento o de definición de estrategias de control o intervención sobre la realidad.

Se entiende por modelación hidrológica la descripción matemática de la respuesta de una cuenca ante la ocurrencia de una serie de eventos de precipitación, por lo general generan hidrogramas en sitios donde no se encuentran estaciones meteorológicas (CATIE, 1995).

Además según Chow et al. (1994) la importancia que tienen los modelos hidrológicos estriba en que ayudan a estudiar la operación del sistema y predecir su salida, todo esto en constante dependencia del tiempo. Según el autor también se pueden clasificar los modelos en dos categorías, los físicos y los abstractos.

Los modelos físicos, como su nombre lo indica, son modelos construidos físicamente a escala, simulando el área en estudio. Los modelos abstractos se basan principalmente en ecuaciones donde se relacionan las variables de entrada con las de salida, esto con el fin de reproducir el comportamiento natural de los fenómenos. Cuando se logran obtener la mayor cantidad de datos dentro de una cuenca es cuando más se afina el modelo, ya que se logra una simulación más apegada a la realidad, y la extrapolación se afina mucho más.

Chow et al. (1994) también menciona que los modelos pueden ser clasificados en estocásticos y determinísticos. Los modelos estocásticos realizan predicciones por medio de estadísticas de los datos reales, esto da como resultado salidas que son parcialmente aleatorias y siempre variables en el tiempo, mientras que los modelos determinísticos no consideran aleatoriedad, es decir, se basan en que una entrada produce una salida, y su salida mantiene un flujo permanente.

Los modelos determinísticos usualmente simulan caudales a partir de hietogramas y deben de ser calibrados con registros de caudales históricos dentro de la cuenca, esto se realiza para poder obtener modelaciones con mayor fiabilidad de datos posteriormente. (Torres et al., 2004). Otra clasificación que se les da a los modelos es a causa de los periodos que modelan, en este caso encontramos los que simulan eventos y los continuos. Respecto a los modelos que simulan eventos se sabe que se basan en el caudal pico, y que son utilizados para modelar eventos extremos. Este tipo de modelos no simulan la humedad del suelo, la evapotranspiración, el interflujo y el flujo base que producen durante eventos discretos de precipitación (Rojas, 2000).

Los modelos de simulación continua permiten modelar a largo plazo, lo que quiere decir que es necesario contar con más datos, ya que toma en cuenta toda la precipitación de la cuenca, y de esta manera calculan caudales para periodos prolongados de tiempo. Este tipo de modelos permite tomar en cuenta los movimientos del agua por el suelo, el crecimiento de los cultivos, la evapotranspiración en la cuenca y los sedimentos que se producen, es gracias a esto que los resultados se adaptan más a la realidad y los que arrojan resultados más complejos para simular la realidad de la cuenca. Sin embargo la complejidad al procesar gran cantidad de datos y tomar en cuenta tantas variables provoca que calibrar el modelo sea más complejo y tome más tiempo.

Dentro de los modelos de simulación continua se encuentra el que será utilizado para la realización del actual proyecto, el modelo "Soil and Water Assessment Tool" (SWAT); el cual por su complejo análisis de las variables permite un estudio completo de la cuenca.

2.2 SWAT

El programa SWAT (Soil and Water Assessment Tool) fue creado para el Servicio Agrícola de Investigación de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés), para simular y predecir el comportamiento debido al impacto de las prácticas de manejo del suelo en la generación de agua, sedimentos y sustancias agrícolas químicas, esto para cuencas grandes donde además se puede tener complejidad en la variedad de suelos, uso de tierra y condiciones de manejo sobre un tiempo prolongado.

Realiza las simulaciones hidrológicas en dos fases, la fase terrestre del ciclo hidrológico donde se controla la cantidad de agua, sedimentos, las cargas de alimento nutritivo y de pesticidas que van al canal principal de cada sub-cuenca. La segunda división consta de la fase de enrutamiento del ciclo hidrológico, en esta fase se define el movimiento de agua, sedimentos, etc.

Debido a las facilidades que nos brinda el modelo SWAT para el cálculo de diversas variables en cuencas, es que ha sido utilizado en varios países del mundo. Usualmente se modela con un enfoque en específico, ya sea el cálculo de sedimentos, pesticidas o minerales, o desde el punto de vista hidrológico de cálculo de caudales en alguna cuenca.

Es por este motivo que la cantidad de publicaciones científicas y tesis que utilizan SWAT es amplia. Incluso para facilitar su búsqueda, en la página web de SWAT se ofrece un buscador de textos,

donde se puede consultar cualquier tema relacionado al modelo, y buscar información donde ha sido utilizado el modelo.

En el país de origen del modelo, Estados Unidos, se encuentran gran cantidad de artículos con relación a todas las variables del modelo, incluso algunas que hacen análisis del mismo por la programación con que cuenta, sin embargo la gran mayoría tocan temas como la simulación hidrológica o de sedimentos.

El modelo ha sido probado en países de Europa tales como España (Galván et al., 2007) donde según se menciona es una buena herramienta para la simulación de la cuenca, siempre que se pueda calibrar y arroja datos bastante similares a los reales.

Existen estudios que su objetivo es la comparación entre modelos para destacar la adaptación de uno u otro a las condiciones de su país y en específico a la cuenca, así encontramos artículos como el de Esquivel, Bueno, Sánchez, Velásquez, & Delgado (2013) donde compara el modelo SWAT contra el modelo WEAP para simular el escurrimiento de la cuenca Suchiapa en Chiapas, México. En este caso el modelo SWAT se adapta y simula de una manera más realista los datos de caudal. También es utilizado por Correa, Sánchez, & Hernández, (2013) donde se realiza la comparación del SWAT y PATRICAL en distintos enfoques, en cálculo de recarga de acuíferos y modelación de nutrientes.

En Suramérica el modelo SWAT también ha sido utilizado en países tales como Argentina (Kraemer, Chagas, Amábile, & Massobrio, 2011) calculando el escurrimiento producido en una micro cuenca agrícola de la Pampa Ondulada donde concluye dar resultados exitosos para la calibración y validación.

Como se puede observar los estudios con SWAT han sido diversos y en varios continentes del mundo. Esto demuestra que el modelo puede adaptarse a las condiciones de cada país, ya que cuenta con bases de datos donde se pueden ingresar suelos o condiciones de cada sitio.

En Costa Rica han sido pocos los estudios que se han realizado con SWAT, por lo que se cuenta con poca información de los alcances del modelo en esta área. En la revisión bibliográfica se han encontrado cuatro estudios en tres cuencas distintas, las cuales se observan en la Figura 2.3.

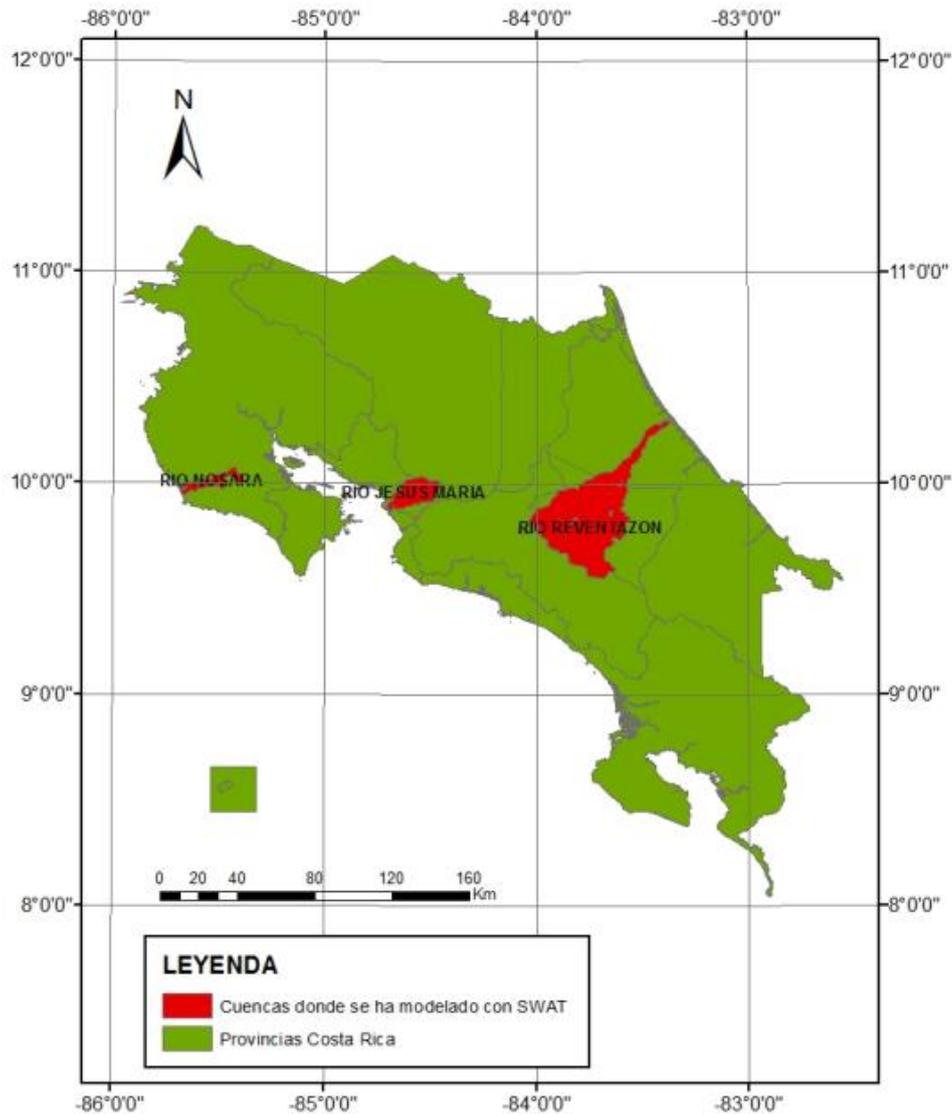


Figura 2.3. Usos de SWAT en Costa Rica.

Se han encontrado datos de dos estudios en la cuenca del Río Reventazón, el primero realiza una evaluación del uso de suelo que se tiene al momento del estudio, el cual es ganadería, y la problemática que presenta este uso para la erosión. Se concluye la importancia que representa tomar medidas como el cambio de uso de suelo para evitar la erosión y propone algunos escenarios con medidas correctivas, para que a la hora de hacer el análisis de sedimentos disminuya su producción. (Salas, 2011).

Dentro de la misma cuenca Arroyo Morales, Heidinger, & Araya Morales (2010) realizan un estudio sobre el modelo como herramienta para procesos de toma de decisión, se le da mayor énfasis al uso

de la herramienta para cuantificar el impacto del uso de suelo en cuanto a sedimentos, nutrientes y cantidad de agua producida, en la micro cuenca Plantón Pacayas, con sus alcances y métodos de uso.

En la zona del Pacífico del país para la cuenca del Río Jesús María el modelo SWAT fue utilizado para presentar el gran deterioro erosivo por la ganadería. En este caso se realizó una simulación del balance hídrico, para conocer el área con mayor problemática de producción de sedimentos. Fue un gran aporte para entender la problemática de la zona, por las diferentes pendientes y uso de suelo que se da, además de poder identificar las zonas críticas donde se debe trabajar con las modificaciones (Arroyo et al., 2010).

Por último, la cuenca de Nosara fue modelada por medio de SWAT, esto debido a la relevancia que tiene el área por sus diversas actividades económicas tales como turismo, agricultura y pesca. El estudio se enfoca en estimar la cantidad químicos que contaminan el río. Es importante realizar un estudio del impacto que este hecho produce en esta área del país, donde se descubre que la gran cantidad de químicos produce gran deforestación, provocando problemas de sedimentación y erosión. De esta manera, se muestra como una herramienta como el SWAT, colabora para la toma de decisiones debido al manejo de cuencas (Benavides & Veenstra, 2005).

Este modelo realiza simulaciones de cuencas por medio de distintos procesos físicos, dividiéndola en sub-vertientes o sub-cuencas llamados unidades de respuesta hidrológica (HRU, por sus siglas en inglés), esto para facilitar la división de uso de suelos y brindar mayor exactitud en sus cálculos, debido a que se asemeja a la realidad. Cada HRU consiste en una combinación única de tipos de suelo, cobertura y pendiente del terreno. Esta división permite al modelo realizar diferentes cálculos de evapotranspiración, escorrentía e infiltración para cada unidad hidrológica creada por el modelo.

Los datos requeridos de entrada para cada sub-cuenca son el clima, uso de suelo, tipo de suelo y pendiente en un modelo de elevación digital (DEM).

Al ser el modelo SWAT un modelo determinístico, realiza su simulación por medio de relaciones matemáticas, las cuales se resumen en una ecuación del equilibrio de agua, la cual es:

$$SW_t = SW_0 + \sum(R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad 2.1$$

Donde SW_t es el contenido final de agua en el suelo (mm), SW_0 representa el contenido inicial de agua del suelo en un día (mm), R_{day} es la cantidad de precipitación en un día (mm), Q_{surf} es la

cantidad de escorrentía de la superficie en un día (mm), E_a es la cantidad de evapotranspiración de un día (mm), W_{seep} es representado por la cantidad de agua que percola en el perfil del suelo en un día (mm), y Q_{gw} es la cantidad de flujo de retorno en un día (mm) el cual se refiere al agua que pasa del acuífero profundo al río.

Esta es la ecuación general de la cual el modelo parte, sin embargo cada proceso cuenta con su análisis y ecuaciones respectivas tomando en cuenta cada variable de entrada, para transformarla en resultados que simulen la realidad. A continuación se realizará un análisis de cada una de las variables tomadas por SWAT para realizar la modelación, partiendo de los datos climáticos.

2.3 DATOS CLIMÁTICOS

En el modelo SWAT podemos ingresar datos reales tomados de estaciones meteorológicas, sin embargo también se da la opción de ser simulados, cada dato cuenta con su sistema de simulación, como se explica a continuación.

La precipitación es una variable que puede ser tomada por el modelo como datos reales de entrada, lo cual es recomendado, ya que es una de las principales variables que modifican los resultados finales. Sin embargo, de no contar con los datos el modelo realiza una simulación que genera precipitación diaria utilizando un modelo de cadena de primer orden de Markov, para asignar un número que represente si el día será húmedo o seco, y a partir de este valor generar una distribución sesgada o exponencial para generar los datos de lluvia.

En conjunto con la precipitación, la temperatura máxima y mínima es una de las variables que más influye en los datos finales de la simulación. Sin embargo de no contar con estos el modelo genera los datos por medio de una distribución normal. Además a la radiación solar, la temperatura aérea se ajusta con los datos de precipitación, de manera que si es un día lluvioso la temperatura y la radiación solar disminuyen, y si es un día seco aumentan.

De no agregarse los datos reales de humedad relativa, el modelo SWAT los simula por medio de una distribución triangular, y al igual que en los datos anteriores realiza una relación con la precipitación para asignar un valor si es un día húmedo o si es seco.

La velocidad del viento es simulada por medio de una ecuación exponencial modificada para calcular valores diarios, o al igual que las variables anteriores, insertada en datos reales.

2.3.1 *Infiltración y escorrentía*

Una vez que el ciclo hidrológico pasa por la fase de precipitación el agua es interceptada en tierra de diferentes formas, las cuales son interpretadas por SWAT de la siguiente manera.

Una cantidad del agua de lluvia cae sobre la vegetación que se reporta en el uso de suelo del área estudiada, el modelo detecta la superficie del follaje vegetativo y el usuario puede ingresar la cantidad máxima de agua que puede ser almacenada en un índice máximo de hoja. Una vez que el modelo calcula la evaporación del agua, remueve primero la almacenada en la cobertura vegetativa.

El agua que no es interceptada por la vegetación puede caer al suelo descubierto y entrar en un perfil de la superficie terrestre. Una vez que ocurre esto y el suelo se va saturando el modelo llega a un valor constante de infiltración, y de esta manera se llega a una tasa final de infiltración equivalente a la conductividad hidráulica saturada de la tierra.

El modelo puede calcular la infiltración por dos métodos, el método de infiltración Green & Ampt, o por diferencia con el cálculo de escurrimiento, ya que la infiltración es la diferencia entre la cantidad de lluvia y la cantidad de escorrentía, está calculada por el método de distribución del número de curva (CN por sus siglas en inglés) del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS, por sus siglas en inglés).

2.3.2 *Distribución del número de curva SCS*

El Servicio de Conservación de Suelos (SCS) de los Estados Unidos desarrolló un método para calcular la escorrentía asignándole diferentes atributos al suelo y categorizándolo, para así determinar la cantidad de agua que se infiltra y la que escurre.

Esto se realiza tomando los datos de una tormenta como un todo, para determinar que el agua que escurre es igual o menor a la profundidad de precipitación (P), sin embargo al inicio de la precipitación la escorrentía es la más baja o nula, ya que el suelo comienza a infiltrar a partir de una abstracción inicial en la cual se encuentra incluida el almacenaje de la superficie, intercepción e infiltración antes del cálculo (I_a), una vez iniciado el proceso de escorrentía se calcula un parámetro que depende del tipo de suelo clasificado por el SCS que determina la profundidad adicional del agua retenida en la cuenca, este valor es menor o igual a la retención potencial máxima (S). La clasificación propuesta por el SCS depende del cambio de suelos, uso de la tierra, pendiente del

terreno y temporalmente debido al cambio en el contenido de agua del suelo. Es así como se obtiene la ecuación 2.2:

$$Q_{\text{surf}} = \frac{(R_{\text{day}} - I_a)^2}{(R_{\text{day}} - I_a + S)} \quad 2.2$$

Al experimentar con cuencas pequeñas se desarrolla la siguiente relación empírica:

$$I_a = 0.2S \quad 2.3$$

Por lo que la ecuación 2.2 en combinación con la 2.3 se obtiene:

$$Q_{\text{surf}} = \frac{(R_{\text{day}} - 0.2S)^2}{(R_{\text{day}} + 0.8S)} \quad 2.4$$

Además el parámetro de retención S es calculado de la siguiente manera:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad 2.5$$

donde CN representa el número de distribución para el día.

Como se mencionó anteriormente el número de curva es una función que depende de la permeabilidad del suelo, uso de la tierra y condiciones antecedentes del agua en el suelo, este último parámetro divide el cálculo del número de curva en tres condiciones distintas. Para condiciones normales (CN II), condiciones secas (CN I) y condiciones húmedas (CN III), los parámetros que definen que condiciones de número de curva se muestran en la Tabla 2.1 .

Tabla 2.1. Clasificación de clases antecedentes de humedad (AMC) para el método de abstracciones de lluvia del SCS.

Grupo AMC	Lluvia antecedente total de 5 días (pulg.)	
	Estación inactiva	Estación de crecimiento
I	Menor de 0,5	Menor de 1,4
II	0,5 a 1,1	1,4 a 2,1
III	Arriba de 1,1	Sobre 2,1

Fuente: (Chow et al., 1994)

El cálculo para las condiciones de tipo II se realiza por medio de las tablas incluidas por Chow et al., (1994) donde se toma en cuenta las condiciones del área en estudio, ya sea urbano o con algún tipo de cultivo.

Los grupos hidrológicos clasificados por el Servicio de Conservación de los Recursos Naturales de los Estados Unidos son cuatro, basados en las características de la infiltración del suelo. El potencial de escorrentía está influido por propiedades como el nivel freático alto estacional, conductividad hidráulica saturada y profundidad a una capa permeable lentamente. Según estas características el suelo puede ser clasificado en A, B, C y D o en tres clases dobles A/D, B/D o C/D, para varios tipos de suelo se puede hacer un cálculo compuesto de CN. Las características del suelo según explica Chow et al. (1994) son:

- Clase A: arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados.
- Clase B: suelos poco profundos depositados por el viento, marga arenosa.
- Clase C: margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con altos contenidos de arcilla.
- Clase D: suelos que se expanden significativamente cuando se mojan, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos.

Para condiciones más secas el número de curva I, se calcula por medio del CN II, de la siguiente manera:

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20*(100-CN_2)}{(100-CN_2+\exp(2.533-0.0636*(100-CN_2)))} \quad 2.6$$

Y para condiciones húmedas el número de curva III se calcula por medio de la ecuación 2.7

$$CN_3 = CN_2 * \exp(0.00673 * (100 - CN_2)) \quad 2.7$$

El método de curva tradicional donde el CN depende del perfil del suelo es una opción que brinda el SWAT, ya que desde el SWAT 2005 se introdujo la opción de ligar el valor CN diario como una función de la evapotranspiración de las plantas, ya que el método de humedad pronostica demasiada escorrentía en suelos poco profundos, esto permite volver el CN menos dependiente del almacenaje en el suelo y más dependiente del clima en días anteriores.

Cuando el parámetro de retención es calculado por medio del perfil del suelo, SWAT lo calcula utilizando la ecuación:

$$S = S_{max} * \left(1 - \frac{SW}{(SW + \exp(w_1 - w_2 * SW))}\right) \quad 2.8$$

Donde S es el parámetro de retención para un día cualquiera (mm), S_{max} es el valor máximo que el parámetro de retención puede obtener en un día cualquiera (mm), S_w es el contenido de agua en suelo del perfil completo excluyendo la cantidad de agua en el perfil en el punto de marchitez (mm), w_1 Y w_2 son parámetros de forma.

S_{max} se calcula al resolver S de la ecuación 2.8. Los parámetros de forma se calculan con las ecuaciones 2.9, 2.10, asumiendo que:

- el parámetro de retención para la curva numérica de condición de humedad I, corresponde al punto de marchitez en el perfil del suelo.
- el parámetro de retención corresponde a la curva numérica de condición de humedad III para el contenido de agua del perfil de suelo de la capacidad de campo
- el suelo tiene un número de curva de 99 cuando está completamente saturado.

Es así como se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$w_1 = \ln\left(\frac{FC}{1 - S_3 * S_{max}^{-1}} - FC\right) + w_2 * FC \quad 2.9$$

$$w_2 = \frac{(\ln\left(\frac{FC}{1 - S_3 * S_{max}^{-1}} - FC\right) - \ln\left(\frac{SAT}{1 - 2.54 * S_{max}^{-1}} - SAT\right))}{SAT - FC} \quad 2.10$$

Donde W_1 es el primer coeficiente de forma, W_2 es el segundo coeficiente de forma, FC es la cantidad de agua en el perfil del suelo a capacidad de campo (mm), S_3 es el parámetro de retención para el número de curva de la condición de humedad III, S_{max} es el parámetro de retención del número de curva para la condición de humedad I, Sat es la cantidad de agua en el perfil del suelo cuando está completamente saturada (mm), 2.54 es el valor del parámetro de retención para un número de curva de 99.

Cuando el número de retención depende de la evapotranspiración de las plantas, SWAT lo calcula con la siguiente ecuación:

$$S = S_{prev} + E_o * \exp\left(\frac{-cncoef - S_{prev}}{S_{max}}\right) - R_{day} - Q_{surf} \quad 2.11$$

Donde S es el parámetro de retención de un día (mm), S_{prev} es el parámetro de retención del día anterior (mm), e_o es la evapotranspiración por el día (mm d-1), $cncoef$ es el coeficiente de peso utilizado para calcular el coeficiente de retención para los cálculos del número de curva diario dependientes en la evapotranspiración de las plantas, S_{max} es el valor máximo del parámetro de retención que se puede alcanzar en cualquier día dado (mm), R_{day} es la profundidad de la lluvia por el día (mm), Q_{surf} es la escorrentía superficial (mm H₂O). El valor inicial del parámetro de retención se define como $S=0.9*S_{max}$.

2.3.3 Método de infiltración Green & Ampt

El otro método que utiliza SWAT para calcular escorrentía, es calculando la infiltración por medio del método Green & Ampt, la que asume que el perfil del suelo es homogéneo y la humedad antecedente es distribuida uniformemente en el perfil.

El método se incorporó a SWAT para tener una opción alternativa para el cálculo de escorrentía, y utiliza la ecuación de Green-Ampt Mein-Larson, ya que estos últimos desarrollaron una metodología para determinar tiempo de estancamiento con infiltración con la ecuación de Green & Ampt. Sin embargo para este cálculo son necesarios datos subdiarios, y en el estudio de la presente tesis los datos suministrados son diarios, por lo que no se hondará más en la metodología.

2.3.4 Tiempo de concentración

El modelo SWAT subdivide el cálculo de tiempo de concentración en dos partes, la primera se encarga de realizar el cálculo del tiempo que le toma al flujo ir desde el punto más remoto de la subcuenca hasta el canal o río, y la segunda etapa realiza el cálculo a lo largo del canal o río hasta el punto de salida de la cuenca. Esto se observa en la siguiente ecuación:

$$t_{conc} = t_{ov} + t_{ch} \quad 2.12$$

Donde t_{ov} representa el tiempo de concentración del flujo superficial y t_{ch} el tiempo en el canal o río, los valores en horas.

El SWAT realiza este cálculo a nivel de HRU, para esto realiza dos modificaciones que se adaptan a las ecuaciones de HRU, la primera reemplaza el área de la subcuenca por el área del HRU, y segundo

el término de longitud del canal que se utiliza en el cálculo del tiempo de concentración del flujo del canal se multiplica por la fracción del área de la subcuenca con el HRU de interés.

El cálculo para el tiempo de concentración del flujo terrestre se realiza con la siguiente ecuación:

$$t_{ov} = \frac{L_{slp}}{3600 * v_{ov}} \quad 2.13$$

Donde L_{slp} representa la longitud de la inclinación de la subcuenca (m), 3 600 es un factor de conversión, v_{ov} es la velocidad del flujo superficial (m/s) y puede ser estimada por medio de la ecuación de Manning al considerar una tira de un metro de ancho hacia abajo de la superficie inclinada y calculada con

$$v_{ov} = \frac{0.005 * L_{slp}^{0.4} * slp^{0.3}}{n^{0.6}} \quad 2.14$$

slp es la pendiente promedio en la subcuenca (m/m), n representa el coeficiente de Manning.

Al sustituir v_{ov} en la 2.13, tenemos la ecuación

$$t_{ov} = \frac{L_{slp}^{0.6} * n^{0.6}}{18 * slp^{0.3}} \quad 2.15$$

El tiempo de concentración del canal se calcula por medio de la ecuación:

$$t_{ch} = \frac{L_c}{3.6 * v_c} \quad 2.16$$

Donde L_c es la longitud promedio del canal (km), v_c es la velocidad promedio del canal (m/s), 3,6 es un factor de conversión de unidades.

La longitud promedio es calculada por medio de

$$L_c = 0,71 * L \quad 2.17$$

Donde L es la longitud del canal desde el punto más distante hasta la salida de la subcuenca (km)

La velocidad promedio se toma como un canal trapezoidal con pendiente lateral 2:1 y con proporción de ancho-alto de 10:1, por medio de Manning se calcula

$$V_c = \frac{0,489 * q_{ch}^{0.25} * slp_{ch}^{0.375}}{n^{0.75}} \quad 2.18$$

Donde q_{ch} es el índice de flujo promedio del canal (m^3/s), slp_{ch} es la inclinación del canal (m/m), n es el coeficiente de aspereza para el canal.

El índice de flujo promedio puede pasarse a unidades de mm/h por medio de la siguiente expresión

$$q_{ch} = q_o * (100 * Area)^{-0.5} \quad 2.19$$

Donde q_o es el índice de flujo del área de unidad fuente canal, y se asume que su valor es de $6,35$ mm/hr , el área es el de la subcuenca (km^2)

Sustituyendo en la ecuación de velocidad promedio, obtenemos

$$V_c = \frac{0.317 * Area^{0.125} * slp_{ch}^{0.975}}{n^{0.75}} \quad 2.20$$

Una vez que tenemos esta velocidad la sustituimos en la 2.16

$$t_{ch} = \frac{0.62 * L * n^{0.75}}{Area^{0.125} * slp_{ch}^{0.375}} \quad 2.21$$

2.3.5 Fórmula racional del SWAT

Según Chow et al., 1994 el método racional calcula el caudal de entrada del sistema por medio de una lluvia con intensidad i que empieza en forma instantánea y continua de forma indefinida, la tasa de escorrentía continuará hasta llegar al tiempo de concentración t_c . La intensidad de lluvia junto con el área de la cuenca forman el caudal de entrada del sistema, y la relación entre este caudal y el caudal pico es conocido con el nombre del Coeficiente de escorrentía (C), el cual varía entre 0 y 1.

SWAT realiza unas modificaciones al cálculo tradicional del método racional, el cual comúnmente se calcula como:

$$Q = \frac{CiA}{3.6} \quad 2.22$$

SWAT realiza el cálculo de C por medio de la ecuación:

$$C = \frac{Q_{surf}}{R_{day}} \quad 2.23$$

Donde Q_{surf} representa la escorrentía superficial (mm H₂O) y R_{day} la lluvia del día (mm H₂O).

El cálculo de la intensidad de la lluvia es basado en el índice promedio de lluvia durante el tiempo de concentración, en este caso se utiliza la ecuación:

$$i = \frac{R_{tc}}{t_{conc}} \quad 2.24$$

Donde R_{tc} es la cantidad de lluvia que cae durante el tiempo de concentración.

Basados en un análisis de varios datos de lluvia de diferentes duraciones y frecuencias, el SWAT toma la precipitación que cae durante cierto tiempo de concentración de manera proporcional a la cantidad de lluvia caída en un periodo de 24 horas. Lo cual se puede transcribir en la siguiente ecuación

$$R_{tc} = \alpha_{tc} * R_{day} \quad 2.25$$

En esta ecuación α_{tc} representa la fracción de lluvia diaria que sucede durante el tiempo de concentración.

Sustituyendo las ecuaciones 2.23, 2.24 y 2.25, en la ecuación tradicional de la formula racional obtenemos

$$Q = \frac{\alpha_{tc} * Q_{surf} * Area}{3.6 * t_{conc}} \quad 2.26$$

De esta manera SWAT calcula el caudal pico que entra a cada subcuenca en estudio.

2.3.6 Evapotranspiración

De la misma manera que la precipitación lleva el agua a la tierra, la evapotranspiración devuelve el agua a la atmósfera y se considera que es una de las principales pérdidas de agua que se produce en una cuenca. Su importancia radica en la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración se encuentra la cantidad de agua que está disponible.

El modelo SWAT contempla diversas formas de evapotranspiración las cuales son el agua retenida y posteriormente evaporada en el dosel forestal, la transpiración, la sublimación y la evaporación de la tierra. A continuación se estudia a fondo el cálculo de cada uno interpretado desde el modelo.

2.3.6.1 ALMACENAMIENTO DE DOSEL FORESTAL

Cuando se registra un día de lluvia, la precipitación que cae llena primero el dosel antes que caiga agua al suelo. El cálculo es realizado por el modelo dependiendo de que la cantidad de precipitación almacenada en un día dado previo sea removida comparado con la cantidad máxima de agua que puede ser atrapada en el dosel y la cantidad inicial de agua libre contenida en el dosel. Esto se representa por las siguientes ecuaciones

$$R_{int(f)} = R_{inti} + R'_{day} \quad \text{y} \quad R_{day} = 0 \quad 2.27$$

cuando $R'_{day} \leq can_{day} - R_{INT(f)}$

$$R_{int(f)} = can_{day} \quad \text{y} \quad R_{day} = R'_{day} - (can_{day} - R_{int(i)}) \quad 2.28$$

cuando $R'_{day} > can_{day} - R_{int(i)}$

Donde $R_{int(f)}$ es la cantidad final de agua contenida en el dosel en un día (mm), R_{inti} es la cantidad inicial de agua libre contenida en el dosel (mm), R'_{day} es la cantidad de precipitación en un día previo a que la intercepción de dosel se remueva (mm H₂O), R_{day} es la cantidad de precipitación en un día dado que alcanza la superficie de la tierra (mm), can_{day} es la cantidad máxima de agua que puede ser atrapada en el dosel en un día dado (mm), y se calcula de la siguiente manera

$$can_{day} = can_{mx} * \frac{LAI}{LAI_{max}} \quad 2.29$$

can_{max} es la cantidad máxima de agua que puede ser atrapada en el dosel cuando está desarrollado completamente (mm), LAI indica el índice de área de hoja por un día y LAI_{max} es el índice máximo de área de hoja por un día.

2.3.6.2 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

Esta se refiere a la proporción en la cual la evapotranspiración ocurre en un área cubierta uniformemente y completa de vegetación creciente que tiene acceso a un suministro ilimitado de agua terrestre.

El cálculo de evapotranspiración potencial ha sido desarrollado por varios métodos, tres de estos son integrados al SWAT para poder calcularla. Esto son Penman-Monteith, Priestley-Taylor y el método de Hargreaves.

El método por el cual se desea realizar el cálculo cambia dependiendo de la cantidad de entradas que se le realizan al programa. De esta manera por el método de Penman-Monteith es necesario ingresar datos de radiación solar, temperatura aérea, velocidad relativa, humedad y viento. El método de Priestley-Taylor requiere radiación solar, temperatura aérea y humedad relativa. Para el método de Hargreaves es necesario solamente temperatura aérea.

2.3.6.3 PENMAN-MONTEITH

Por este método se combinan componentes que mantienen la energía para sostener la evaporación en conjunto con la fuerza de mecanismo necesario para quitar el vapor del agua, y términos aerodinámicos de superficie de resistencia. Todo esto se encuentra dentro de la siguiente ecuación

$$\lambda E = \frac{\Delta(H_{\text{net}} - G) + \rho_{\text{air}} * C_p * \frac{e_z^0 - e_z}{r_a}}{\Delta + \gamma * \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad 2.30$$

Esta expresión se encuentra compuesta por λE la densidad latente del flujo de calor (MJ/Md), E es la evaporación de la tasa de profundidad (mm/d), Δ es la pendiente de la curva de saturación de presión de vapor-temperatura (kPa/°C) H_{net} es la radiación neta (MJ/Md), G es la densidad de flujo de calor al suelo (MJ/Md), ρ_{air} es la densidad aérea (kg/m³), C_p es el calor específico en presión constante (MJ/kg c), e_z es la saturación de la presión de vapor de aire en altura Z (kPa), e_z es la presión del vapor del agua del aire en altura Z (kPa), γ es la constante psicométrica (kPa/°C), r_c es la resistencia de dosel forestal (s/m) y r_a es la resistencia aerodinámica (s/m).

Otra ecuación propuesta para plantas bien irrigadas bajo estabilidad atmosférica neutral y asumiendo perfiles logarítmicos de viento, es la siguiente

$$\lambda E_t = \frac{\Delta * (H_{net} - G) + \gamma * k_1 * \left(0.622 * \lambda * \frac{\rho_{air}}{P}\right) * (e_z^o - e_z) / r_a}{\Delta + \gamma * \left(1 + \frac{r_a}{r_s}\right)} \quad 2.31$$

Donde λ es el calor latente de vaporización (MJ/kg), E_t es el promedio máximo de transpiración (mm/d), k_1 es un coeficiente de dimensión necesario para asegurar que los dos términos en el numerador tengan las mismas unidades (m/s) y P es la presión atmosférica (kPa).

2.3.6.4 MÉTODO DE PRIESTLEY-TAYLOR

Este método representa una simplificación donde se anula el componente aerodinámico y el componente de energía fue multiplicado por un coeficiente $\alpha_{pet}=1,28$, esto se da bajo condiciones de humedad, y la ecuación es la siguiente.

$$\lambda E_o = \alpha_{pet} * \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} * (H_{net} - G) \quad 2.32$$

Donde λ_{es} el calor latente de evaporización (MJ/kg), E_o es la evapotranspiración potencial (mm/d), α_{pet} es un coeficiente, Δ es la pendiente de la curva de saturación de la presión de vapor-temperatura (kPa/°C), γ_{es} la constante psicométrica (kPa/°C), H_{net} es la radiación neta (MJ/m d) y G es la densidad del flujo de calor al suelo (MJ/m*d).

2.3.6.5 MÉTODO DE HARGREAVES

El método de Hargreaves agregado a SWAT fue publicado en 1985, después de varias mejoras, y su ecuación es

$$\lambda E = 0.0023 * H_o * (T_{mx} - T_{mn}) * 0.5 * (T_{av} + 17.8) \quad 2.33$$

Donde λ representa el calor latente de vaporización (MJ/kg), E_o es la evapotranspiración potencial (mm/d), H_o es la radiación extraterrestre (MJ/M d), T_{mx} es la temperatura aérea máxima por un día (°C), T_{mn} es la temperatura aérea mínima por un día (°C), y T_{av} es promedio en el día (°C).

2.3.7 Evapotranspiración actual

Este término es calculado por el modelo SWAT posterior al cálculo de la evapotranspiración potencial, ya que en algunos casos, como por ejemplo en la transpiración el dato es utilizado. El modelo evapora completamente el agua en el dosel de las plantas y posteriormente calcula la transpiración y la cantidad máxima de evaporación y sublimación de la tierra.

El cálculo de la transpiración es dependiente del método utilizado para la evapotranspiración potencial, ya que si ésta se calculó por medio de la ecuación de Penman-Monteith, la transpiración se realiza con las mismas ecuaciones para este método.

Si se utilizó alguno de los otros dos métodos con que SWAT realiza el cálculo, la transpiración se calcula con la siguiente ecuación:

$$E_t = \frac{E_o * LAI}{3} \quad \text{cuando } 0 \leq LAI \leq 3.0 \quad 2.34$$

$$E_t = E'_o \quad \text{cuando } LAI > 3.0 \quad 2.35$$

E_t representa la transpiración máxima (mm), E'_o es la evapotranspiración potencial ajustada a la evaporación de agua libre en el dosel (mm) y LAI es el índice de área de hoja.

La cantidad de evaporación y sublimación que se da en la tierra es dependiente del grado sombra. La máxima cantidad de sublimación y evaporación del suelo es dada por la ecuación:

$$E_s = E'_o * cov_{sol} \quad 2.36$$

E_s la máxima sublimación/evaporación del suelo en un día (mm), E'_o es la evapotranspiración potencial ajustada para la evaporación de agua libre en el dosel (mm) y cov_{sol} es el índice de cobertura de la tierra, el cual es calculado de la siguiente forma:

$$cov_{sol} = \exp(-5.0 \times 10^{-5} * CV) \quad 2.37$$

Donde CV es la biomasa y el residuo de la superficie (kg/ha).

La demanda de evaporación de la tierra calculada por SWAT, depende de la profundidad a la que se realiza. Es por este motivo que la ecuación utilizada extrae el 50 % del agua en los primeros 10 mm, y el 95% en los primeros 100 mm de profundidad, así se muestra en el siguiente gráfico, mostrado en los documentos brindados por SWAT.

La ecuación que cumple con esta gráfica cuenta con un término de profundidad Z, la evaporación máxima de agua en la tierra E''_s , y calcula la evaporación en cierta capa seleccionada.

$$E_{soil,z} = E_s'' * \frac{z}{z + \exp(2.374 - 0.00713 * z)} \quad 2.38$$

Finalmente, el agua evaporada del suelo en todo el perfil se calcula por medio de la diferencia de las demandas en evaporación entre el límite superior y el inferior, como se muestra a continuación,

$$E_{soil,ly} = E_{soil,zl} - E_{soil,zu} \quad 2.39$$

SWAT ha integrado un coeficiente para permitir que el usuario modifique la cantidad de agua que extrae de cada capa, con el nombre de esco es el coeficiente de compensación de evaporación de la tierra y es agregado a la 2.40 de la siguiente forma:

$$E_{soil,ly} = E_{soil,zl} - E_{soil,zu} * esco \quad 2.40$$

La variación que permite el coeficiente se presenta en la Figura 2.4.

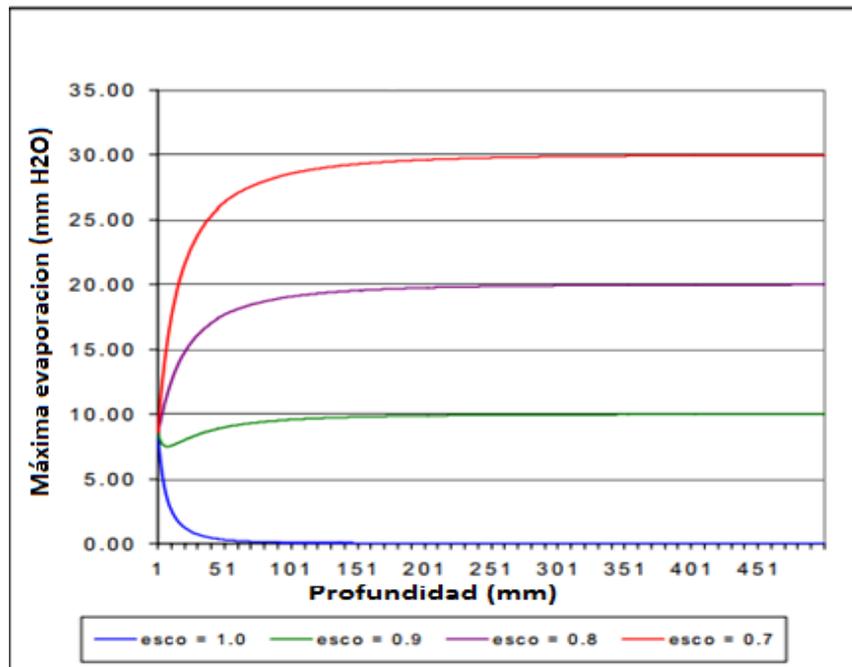


Figura 2.4. Evaporación producida con distintos valores esco.

Fuente: (Neitsch, Kiniry, & Williams, 2009)

Cuando el contenido de agua en la capa de la tierra está debajo de la capacidad de campo, el modelo utiliza otra ecuación de extracción de agua por evaporación, la cual es:

$$E'_{soil,ly} = E_{soil,ly} * \exp\left(\frac{2.5*(SW_{ly}-FC_{ly})}{FC_{ly}-WP_{ly}}\right) \quad 2.41$$

SW_{ly} es el contenido de agua real en la capa del cálculo, FC_{ly} es el contenido de agua en la misma capa en capacidad de campo y WP_{ly} es el contenido de agua en el punto de marchitez.

Finalmente SWAT pone un límite de agua que puede ser removido del suelo por evaporación, este límite es 80%, y para el cálculo final del agua que es removida por evaporación se calcula por medio de la Ecuación 2.42.

$$E''_{soil,ly} = \min\left(E'_{soil,ly} * 0.8 * (SW_{ly} - WP_{ly})\right) \quad 2.42$$

2.3.8 Agua subterránea

Para realizar los cálculos de movimiento de agua subterránea, SWAT toma en cuenta la capa de textura y estructura de los suelos, de esta manera realiza cálculos de densidad aparente. El movimiento del suelo es dependiente de la cantidad y tamaño de los poros, es por este motivo que un suelo arenoso drena más rápidamente que la arcilla, el cual tiene una mayor cantidad de micro poros.

Para cada capa del suelo el SWAT realiza una estimación del contenido volumétrico de agua en el punto de marchitez, por medio de la siguiente ecuación:

$$WP_{ly} = 0.40 * \frac{mc * \rho_b}{100} \quad 2.43$$

Donde WP_{ly} es el contenido de agua en el punto de marchitez, expresado como una fracción del volumen total del suelo, mc es el porcentaje de contenido de arcilla, ρ_b es la densidad aparente para la capa del suelo (Mg/m^3).

También se realiza el cálculo de la cantidad de agua disponible para las plantas como:

$$AWC = FC - WP \quad 2.44$$

donde AWC es el contenido de agua disponible para las plantas, FC es el contenido de agua en la capacidad de campo y WP es el contenido de agua de marchitez permanente. Cada valor es calculado con la siguiente tabla para los valores de FC y WP .

Tabla 2.2. Contenido de agua para suelos con diversas condiciones de humedad

Contenido de agua (fracción total del volumen del suelo)				
Textura	Contenido de arcilla (%sólidos)	Saturación	Capacidad de campo	Punto de marchitez permanente
Arena	3%	0,40	0,06	0,02
Limo	22%	0,50	0,29	0,05
Arcilla	47%	0,60	0,41	0,20

Fuente: Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2005

2.3.9 Infiltración

SWAT permite la infiltración entre capas únicamente si el contenido de agua excede el contenido de agua de la capacidad de campo, y la capa de abajo no se encuentra saturada.

El cálculo de la cantidad de agua que se infiltra, es realizado únicamente de manera vertical, y utiliza la metodología de encaminamiento del almacenamiento, utilizando la siguiente ecuación:

$$W_{\text{perc,ly}} = SW_{\text{lyexcess}} \left(1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{TT_{\text{perc}}}\right) \right) \quad 2.45$$

Donde $W_{\text{perc,ly}}$ es la cantidad de agua que se infiltra en una capa (mm), SW_{lyexcess} es el volumen de agua que drena en una capa (mmH₂O), Δt es el lapso del tiempo (hr) y TT_{perc} es el tiempo que tarda la infiltración (hr). SW_{lyexcess} es calculado de la siguiente manera:

$$SW_{\text{lyexcess}} = SW_{\text{ly}} - FC_{\text{ly}} \quad \text{si } SW_{\text{ly}} > FC_{\text{ly}} \quad 2.46$$

$$SW_{\text{lyexcess}} = 0 \quad \text{si } SW_{\text{ly}} \leq FC_{\text{ly}} \quad 2.47$$

SW_{ly} es el contenido de agua en un día dado, FC_{ly} es el contenido de agua en capacidad de campo. El tiempo de infiltración es calculado para cada capa en horas y se utiliza la ecuación:

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat}} \quad 2.48$$

SAT_{ly} es la cantidad de agua en el suelo cuando este está totalmente saturado (mm), FC_{ly} es el contenido de agua de la capa de suelo en la capacidad de campo (mm) y K_{sat} es la conductividad hidráulica saturada en la capa (mm/h).

2.4 CALIBRACIÓN HIDROLÓGICA

Todo modelo hidrológico está sujeto a errores, que dependiendo del número de variables con que se cuenta puede afectar considerablemente los resultados. Estos errores son clasificados normalmente en dos tipos, aleatorios o sistemáticos. Los primeros ocurren cuando el error varía para un número sucesivo de intervalos, es decir el error se encuentra en que no se realizan más pruebas, por lo tanto se toma como un hecho el resultado de una o muy pocas pruebas. Al contrario, los errores sistemáticos se mantienen a lo largo de varios intervalos de tiempo, esto puede deberse a un error repetitivo al hacer la toma de datos.

En el presente estudio los errores sistemáticos se encuentran fuera de control del estudio, ya que los datos son brindados por instituciones estatales, que se encargan de la toma de datos meteorológicos. Sin embargo los errores aleatorios pueden ser corregidos, realizando una comparación de los datos arrojados por el modelo y los medidos en la realidad.

Según Arroyo et al. (2010), quienes utilizaron el modelo para un estudio en la cuenca de Plantón-Pacayas en la provincia de Cartago, la calibración del modelo SWAT tiene la posibilidad de realizarse desde tres diferentes ajustes, los cuales son:

- Caudales en la salida de la subcuenca
- Datos de calidad de agua en la cuenca (nutrientes y pesticidas)
- Producción de sedimentos por subcuencas

El primer paso para iniciar la calibración es detectar los parámetros del programa que son más sensibles para afectar los resultados finales. Sin embargo para efectos del actual estudio se hace un enfoque en los parámetros para calibrar la hidrología de las cuencas, a pesar de este enfoque, existen estudios que comprueban que las variables de caudal, sedimento y nutrientes se pueden

calibrar al mismo tiempo, ya que muchas veces son dependientes de los mismos datos. (Arnold et al., 2012)

Engel, Storm, White, Arnold, & Arabi (2007) proponen un esquema el cual permite la calibración de varios parámetros y sus correspondientes ajustes. El procedimiento que se propone es simple, como primer punto se debe realizar la simulación en SWAT, posteriormente comparar los resultados calculados por el modelo con los reales, para evaluar cada resultado se proponen tres metodologías, de las cuales se selecciona una para aceptar los resultados.

La primera se refiere al porcentaje de diferencia entre los datos calculados y los del modelo, el segundo es el coeficiente de determinación (r^2), y el tercero el coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE). Según reportan Arnold et al. (2012) los criterios estadísticos más utilizados son r^2 y NSE, r^2 es un coeficiente que va de 0 a 1, donde 1 muestra perfecta correlación, es decir los datos reales se ajustan al modelo perfectamente, sin embargo se menciona que esto no se ha presentado en ninguno de los estudios de SWAT. El coeficiente NSE varía de $-\infty$ a 1, los datos de salida se grafican de manera que se observa que tanto se acercan a una pendiente de 1.

El valor al cual es permitido para aceptar los datos de calibración muchas veces depende del usuario, ya que si es un proyecto de alto riesgo o normado por la ley, se utiliza el valor requerido por esta. Sin embargo, cerca de 20 estudios realizados con SWAT determinan que un valor satisfactorio de aceptación estadística para calibración de acuerdo con los datos reales es de 0,5 para el cálculo de r^2 y NSE. (Douglas-Mankin, Srinivasan, & Arnorld, 2010)

Como los dos métodos son válidos y aceptados como cálculo de error en la calibración, se decide utilizar el método Nash-Sutcliffe, el cual se calcula por medio de la Ecuación 2.49, donde Y_{obs} es el valor real observado, Y_{sim} el valor simulado y Y_{prom} el promedio de los valores observados. (Moriasi et al., 2007)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{prom})^2} \quad \text{Ecuación 2.49}$$

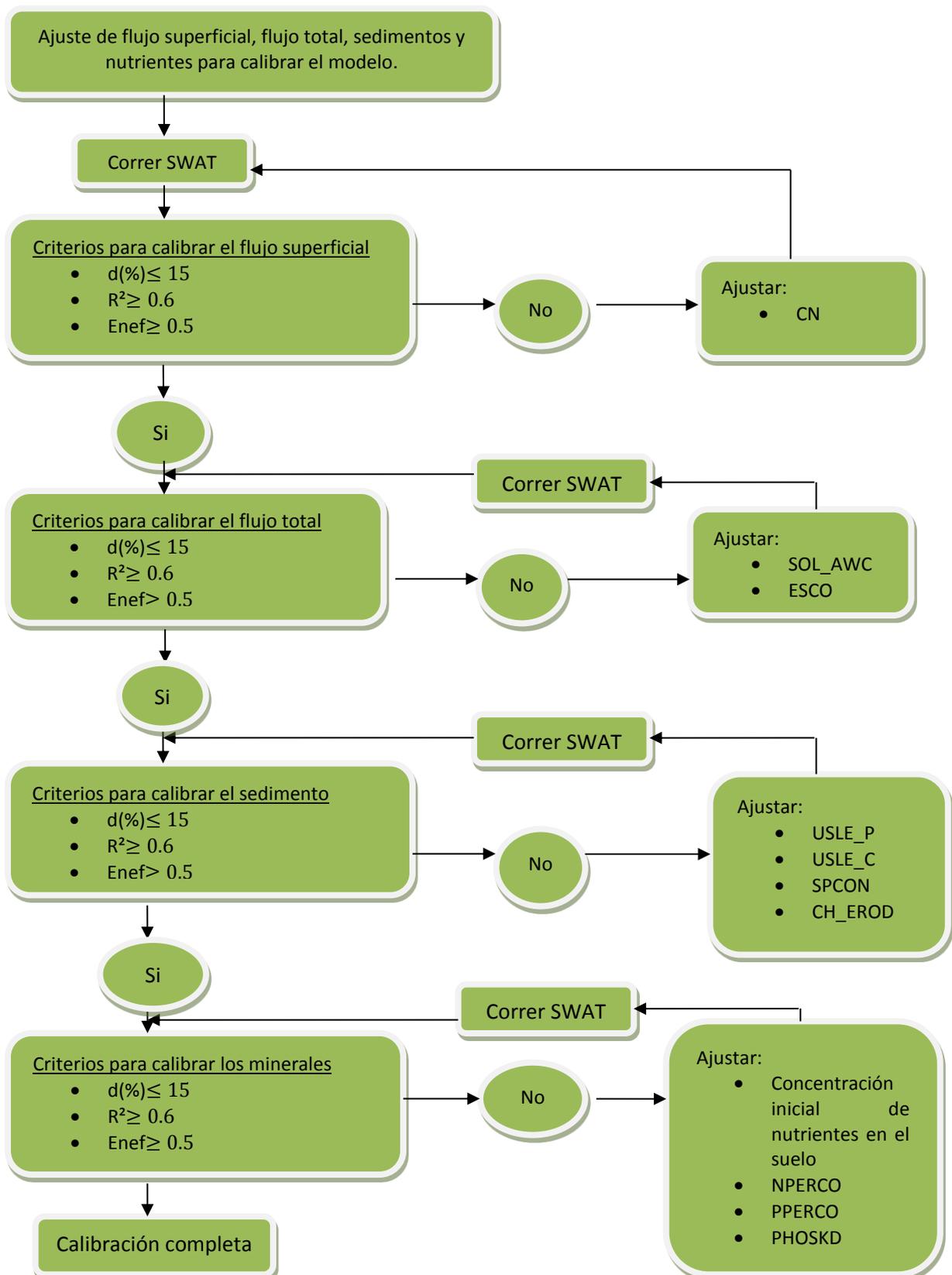


Figura 2.5. Diagrama de calibración de SWAT. Fuente: Engel et al., 2007

De esta manera siguiendo el diagrama de la Figura 2.5, si el cálculo del escurrimiento superficial no cumple con el estándar, se debe de modificar el número de curva hasta llegar acercarlo al valor real. De la misma manera, si el cálculo que realiza el modelo para el flujo total no se acerca al real, los valores de capacidad de agua disponible (SOL_AWC) utilizados en el cálculo de filtración, y los valores de coeficiente de compensación de evaporación del suelo (ESCO) deben de modificarse hasta llegar a valores similares de los medidos. Este mismo principio se utiliza para valores de sedimentos y nutrientes, los cuales no serán estudiados en esta tesis.

En la Tabla 2.3 se muestra un estudio brindado por Arnold et al. (2012), donde se reportan 64 cuencas modeladas y calibradas con SWAT. Entre paréntesis, debajo de la variable calibrada se encuentra la cantidad de veces que fue utilizada para calibrar el modelo en los 64 estudios realizados. Esto denota los parámetros más utilizados para calibración del modelo SWAT.

Tabla 2.3. Calibración en SWAT reportada en 64 estudios

Proceso	Parámetros de entrada					
Escorrentía superficial	CN2 (36)	AWC (28)	ESCO (23)	EPCO (10)	SURLAG (22)	OV_N (8)
Flujo base	GW_ALPHA (28)	GW_REVAP (18)	GW_DELAY (21)	GW_QWN (12)	REVAPMN (13)	RCHARG_DP (14)

CN2: número de curva. AWC: contenido de agua disponible para la planta. ESCO: factor de compensación de la evaporación. EPCO: factor de compensación de absorción de la planta. SURLAG: coeficiente de retardo de escorrentía. OV_N: factor de rugosidad n de Manning. GW_ALPHA: tiempo de recarga del acuífero profundo GW_REVAP: coeficiente de re-evaporación GW_DELAY: retraso de llegada de aguas subterráneas GW_QWN: profundidad umbral en que el acuífero superficial da agua al río. REVAPMN: profundidad umbral en que el acuífero superficial percola al acuífero profundo RCHARG_DP: fracción de percolación del acuífero profundo.

Fuente: (Arnold et al., 2012)

Según los estudios consultados el cambio de un parámetro modifica varios procesos, un ejemplo se observa en el Número de Curva (CN) el cual modifica la escorrentía superficial, y con este cambio todos los componentes del balance hidrológico tales como la erosión del suelo y el transporte de nutrientes. Es a partir de estos estudios donde se obtienen los 3 parámetros de mayor importancia para calibrar los caudales en las subcuencas, los cuales se muestran en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Parámetros sensibles sobre la calibración de SWAT.

Importancia	Parámetro modificado	Significado	Proceso que modifica
1	CN2	Curva numérica en la subcuenca	Escurrimiento superficial
2	SOL_AWC	Capacidad de agua disponible	Escurrimiento superficial
3	ESCO	Factor de compensación de la evaporación del suelo	Escurrimiento superficial

Fuente: Torres-Benites et al., 2004

Capítulo 3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del Tempisque-Bebedero, ubicada en la provincia de Guanacaste, es la cuenca de mayor tamaño en el país, con 5 404, 6 km², representa 53% de la provincia. Su área de influencia va más allá de la cuenca, ya que sus aguas son drenadas por el Río Tempisque y sus afluentes hacia el Golfo de Nicoya.

Constituye uno de los lugares de nuestro país con mayor diversidad de ambientes, incluyendo bosques nubosos, pantanos y manglares. Es por esta riqueza que también ha tenido un acelerado crecimiento en su desarrollo turístico. Sin embargo, siempre ha sido una zona agrícola productiva, donde los cultivos de arroz y azúcar han sido fuente de empleo y prosperidad, y la ganadería casi una cultura de la zona, que viene desde la época de la Colonia.

Forma cerca de una novena parte de la zona del país, y se encuentra conformada por ríos como Garzón, Charco, Bebedero y el Tempisque. Dentro de la cuenca también encontramos la única zona de vida de bosque tropical seco del país, y no menos de seis zonas de vida y zonas de transición, además de ciudades como Tilarán, Cañas, Bagaces, Liberia, Filadelfia, Santa Cruz y Nicoya.

El sistema fluvial está conformado principalmente por los ríos Tempisque y Bebedero, este último es considerado el afluente principal del Tempisque. El Río Tempisque se origina en la Sierra Volcánica de Guanacaste, en las faldas del Volcán Orosi, cuenta con una extensión de 108 km, su caudal medio anual es de 284 m³/s. Es navegable 36 km, desde la desembocadura hasta la confluencia del Río Bolsón (Organización para estudios Tropicales, 2001).

Dentro de la cuenca se encuentran dos acuíferos principales, el acuífero volcánico de la Formación Bagaces, con una capacidad de producción entre 5 y 25 l/s, abasteciendo ciudades como Liberia, Bagaces y Cañas; y el acuífero Coluvio aluvial de la Margen Derecha del Río Tempisque el cual produce 25 l/s, sin embargo se encuentran textos que citan hasta 100 l/s, el agua de este acuífero es utilizado principalmente para riego y en menor cantidad para las poblaciones de la zona. (Organización para estudios Tropicales, 2001)

La zona del presente estudio se ubica en la cuenca de Bebedero, tres subcuencas han sido seleccionadas debido a su importancia para el aporte de agua al proyecto de riego de SENARA. El proyecto se extiende a lo largo de las cuencas Tempisque-Bebedero, sin embargo, en Bebedero se

concentra parte importante del proyecto de riego, como lo son los subdistritos Lajas, Piedras, Cañas y Cabuyo.

Las subcuencas son seleccionadas por abarcar un importante sector del proyecto en estudio, estas son Río Piedras- San Gerónimo y Río Blanco que llevan afluentes del mismo nombre además de Río Potrero, Paso Hondo, Monteverde, Montano, Estanque, Enmendio y Villa Vieja entre los más importantes, también se estudia la subcuenca de Río Tenorio la cual cuenta con ríos como Cuipilapa, San Fe y Tenorio. (Figura 3.1).

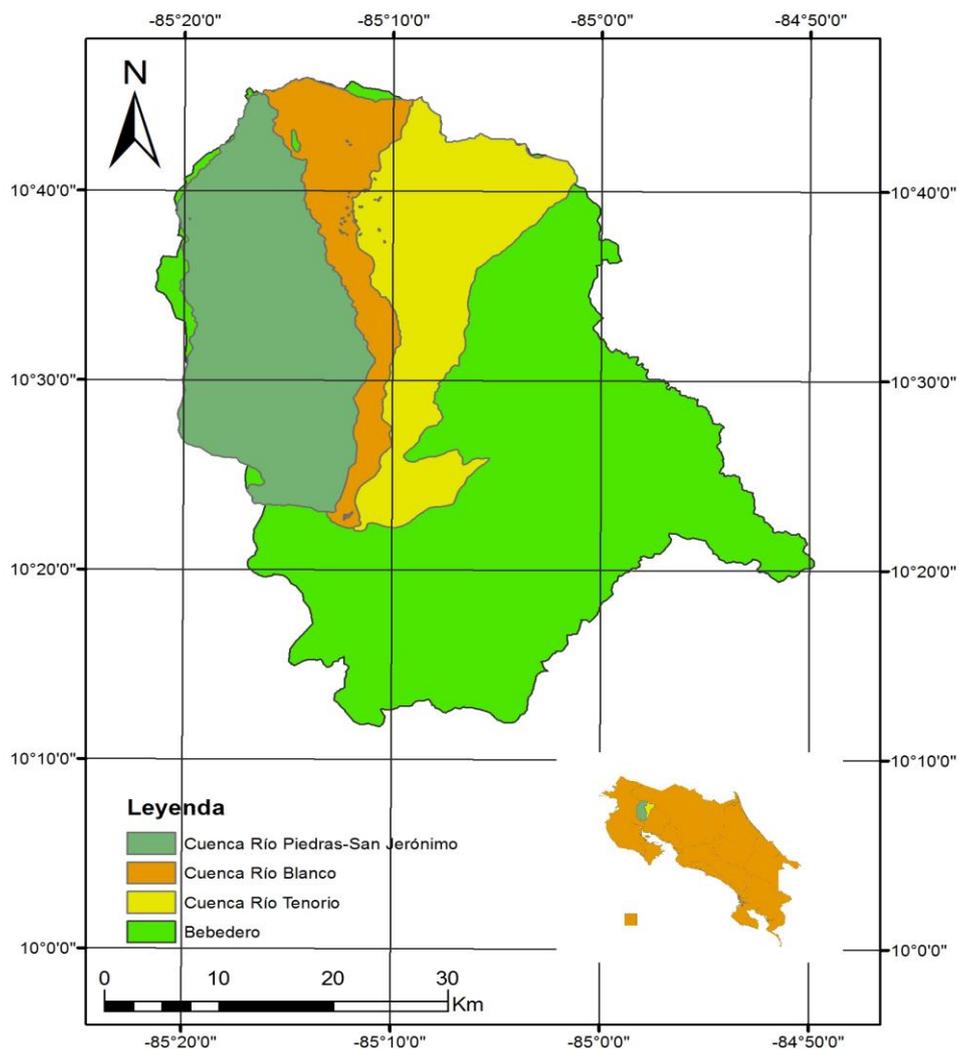


Figura 3.1. Subcuencas en estudio.

3.1 ASPECTOS CLIMÁTICOS

En esta área del país se presentan las temperaturas más altas en conjunto con las precipitaciones más bajas del año, las cuales se mantienen en 26 °C y precipitaciones mensuales promedio de 5 mm, durante los meses más secos, es decir, de diciembre a abril. Por ser una zona con gran extensión agrícola la situación climática se transforma en una problemática, debido al faltante de agua de lluvia, el cual ayuda a alivianar el riego que se debe de dar. Esto es motivo para derivar agua a partir del Embalse del Arenal hacia las plantas hidroeléctricas Sandillal, Arenal y Corobicí, de esta manera mantienen el proyecto en funcionamiento continuo. (Banco Interamericano de Desarrollo, 2008)

Según un informe del MINAE del año 2008 la evapotranspiración más alta del país se encuentra en esta zona, con un valor de 1 384 mm anual de evapotranspiración potencial.

En las subcuencas en estudio se cuenta con 13 estaciones meteorológicas administradas por el ICE, las cuales tienen datos de precipitación, temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento, estas se observan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Estaciones del ICE en las cuencas en estudio

Cuencas	Código	Estación
Río Piedras-San Jerónimo	76035	San Jorge
	76033	Aguabal
	<u>76025</u>	<u>Bagaces</u>
Río Blanco	76039	Mogote
	76045	Guayabo
	76044	Máquinas Miravalles
	<u>76034</u>	<u>Fortuna</u>
Río Tenorio	<u>76029</u>	<u>Río Naranjo</u>
	76050	Pozo 29
	76035	Cuipilapa
	<u>76012</u>	<u>Hacienda Tenorio</u>
	76032	Valle del viento
	76048	Casa vieja

3.2 CARACTERÍSTICAS EDAFOLÓGICAS

Según mapas de suelos creados por el Centro de Investigaciones Agronómicas CIA (2014) de la UCR, las subcuencas en estudio tienen suelos tipo Andisoles y Entisoles los cuales están caracterizados por tener alto porcentaje de infiltración en comparación con los otros suelos. Por este motivo se reporta como una de las cuencas con menor coeficiente de escurrimiento con un 23 %. (Banco Interamericano de Desarrollo, 2008)

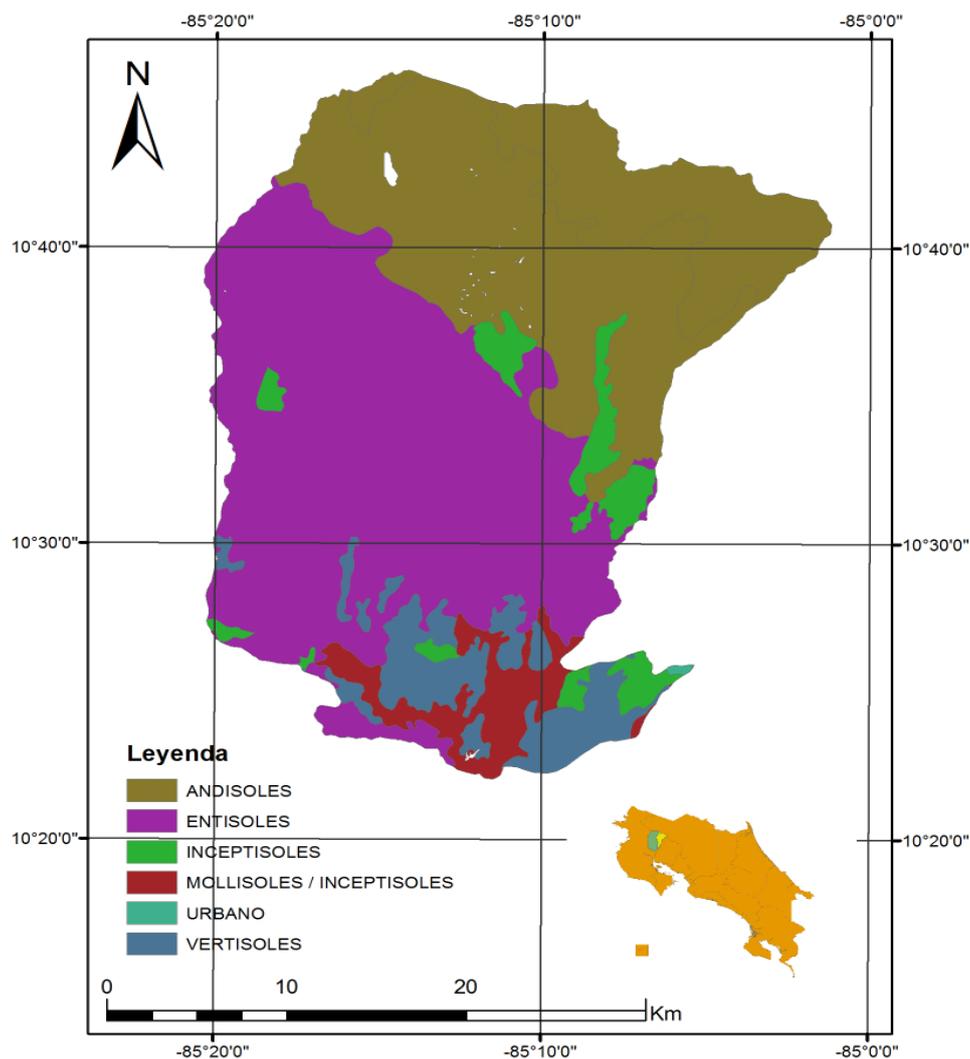


Figura 3.2. Orden de suelos en subcuencas en estudio.

3.3 DRAT

A pesar de que el porcentaje de agua dentro de la cuenca es bajo como se muestra en la Tabla 3.2, se mantienen concesiones constantes y de altos volúmenes, sobre todo para fines agrícolas.

Tabla 3.2. Concesiones superficiales con mayor volumen en la cuenca de Bebedero.

Usuario	Tipo de Uso	Q (m ³ /s)
Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento	Agropecuario, riego, varios	70,00
Bel Ingeniería S.A.	Fuerza hidráulica	48,85
Azucarera El Viejo S.A	Fuerza hidráulica, generación hidroeléctrica	3,50
Ganadera Montezuma S.A.	Fuerza hidráulica	2,51
Ganadera Río Tenorio S.A.	Agropecuario, piscicultura	2,00
Cañera La Brisas	Agropecuario, riego, varios	1,30

Fuente:(Banco Interamericano de Desarrollo, 2008)

La importancia del DRAT radica en sus objetivos bien establecidos en la década de los años 70:

- fomentar el desarrollo agropecuario de la región a través del uso racional del recurso del agua
- incrementar los índices de productividad en las exportaciones agrícolas
- evitar la migración del campesino a las zonas urbanas
- eliminar riesgos de pérdidas de cosecha por sequía
- generar nuevas fuentes de empleo mediante una mayor utilización de mano de obra en la agricultura de regadío y el establecimiento de nuevas agroindustrias
- utilización más intensiva del recurso suelo, pudiéndose obtener hasta dos cosechas anuales
- aumentar el nivel de ingresos de los agricultores para mejorar así sus condiciones de vida

El proyecto fue dividido en dos distritos de riego, el Arenal y el Zapandí. El primero se ubica entre los ríos Abangares y Tempisque, y riega casi totalmente sus tierras por el Complejo Hidroeléctrico ARCOSA; este distrito tiene un área de 40 060 ha y está subdividido en seis subdistritos. El distrito Zapandí, se ubica al margen derecho del río Tempisque y podría ser regado, en parte, con aguas del

Complejo Hidroeléctrico ARCOSA, pero principalmente con aguas subterráneas y del Río Tempisque; este distrito cuenta con una superficie de 19 900 ha, y se divide en dos subdistritos. (Organización para estudios Tropicales, 2001)

El DRAT, por motivos administrativos, ha sido dividido en tres etapas, siguiendo la Figura 3.3 la primera concluyó en 1988 y brinda servicio de riego a 250 productores, cuenta con un área de 8 026,08 ha y tiene dos subdistritos, el de Lajas y Cañas, abastecidos por el canal sur. La segunda etapa provee a 727 productores del servicio de agua, y tiene un área de 10 092 ha, en los subdistritos Piedras y Cabuyo, abastecidos por el canal oeste. Para la tercer etapa se da el servicio para 52 productores y cuenta con un área de 76 93,1 ha, y se encuentran los subdistritos Zapandí Sur y Tempisque. Existe una cuarta etapa que actualmente se encuentra en construcción, esta consiste en la prolongación del canal sur, para abastecer parte de los subdistritos Lajas y Abangares (SENARA, 2008).

Para ubicar la zona del proyecto de modelación, se observa en la Figura 3.3 la subdivisión de los distritos de riego, el estudio se da en la zona de Piedras, donde se encuentran los ríos Piedras y Tenorio.

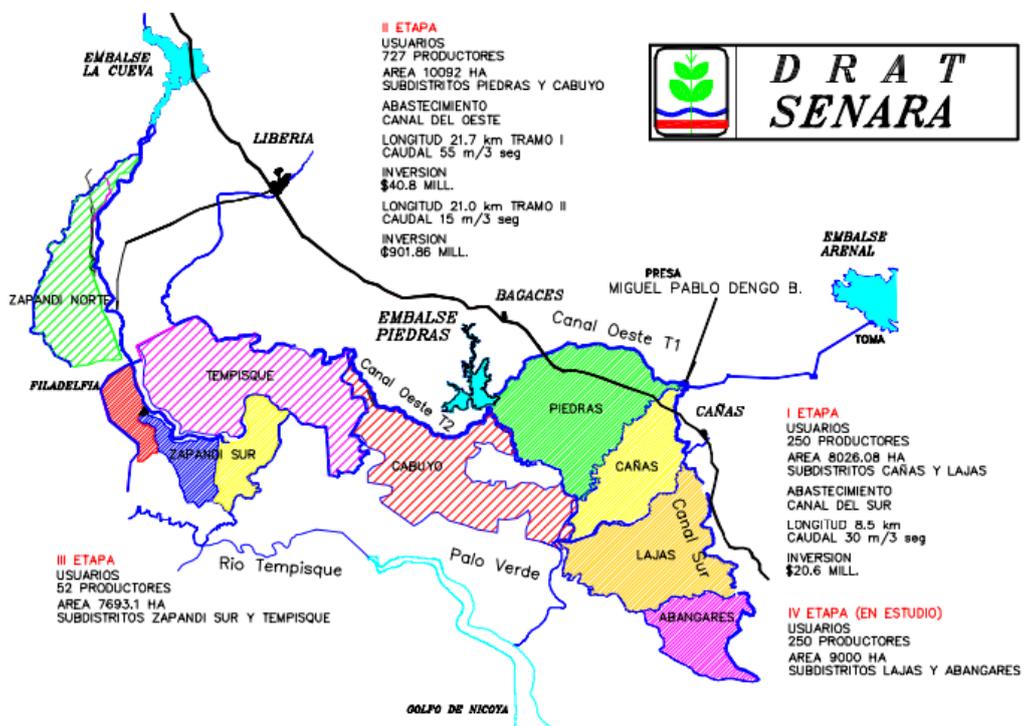


Figura 3.3. Proyecto DRAT.
 Fuente: (SENARA, 2008)

Capítulo 4. **METODOLOGÍA**

Para construir el modelo hidrológico de la cuenca usando el modelo SWAT es necesario como mínimo contar con tres capas de información, información topográfica, el uso de suelos (ráster o vector), y el tipo de suelo (ráster o vector), así como la información correspondiente. Es así como la información de cada una de estas capas ha sido obtenida según se describe a continuación.

4.1 INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA

Para obtener la información topográfica necesaria se utiliza el modelo de elevación digital (DEM) de la zona. Se utiliza el Aster Gdem, el cual se compone de un instrumento radiométrico aportado por el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón, a bordo del satélite TERRA de la NASA. El Aster Dem recoge imágenes del espectro visible además de regiones de longitud de onda de las radiaciones térmicas infrarrojas, y así se produce un mapa topográfico del 99% de la Tierra.

Se descarga una imagen con resolución de 30 m, para delimitar el área de estudio por medio del programa de ArcGis, y prepararla para el procesamiento. Para mejorar el modelo de elevación digital en los lugares de poca pendiente se aplica un proceso de "marcado" por una capa de ríos para así obtener un DEM más completo en cuanto a la delimitación de los cauces de los ríos. En este caso se utiliza la capa de ríos del Atlas con escala 1:150000, la cual según se observa tiene los ríos más importantes de la zona.

4.2 INFORMACIÓN DE USO DE SUELO

Para la creación de una capa de uso de suelo, se realiza una clasificación de suelos no supervisada por medio de Arc Map, para esto se utiliza una imagen Landsat (National Aeronautics and Space Administration NASA) de enero del 2014.

La clasificación de una imagen Landsat consiste en analizar la información espectral de la misma para lograr asociar cada pixel con un uso de suelo, para compararlos con alguna imagen satelital o muestreo de la zona. (Arango Gutierrez, Branch Bedoya, & Botero Fernández, 2005) lo describe como un proceso de agrupación de pixeles con valores digitales similares para todas las bandas y cada una de estas agrupaciones son llamadas clases espectrales, las cuales se supone corresponden a un tipo de cubierta de terreno.

La clasificación no supervisada consiste en hacer un "iso cluster" donde se agrupan los pixeles con el mismo valor espectral en una imagen multibanda, para luego por medio de una imagen georreferenciada de Google Earth comparar algunos usos de suelo identificados, para asignarle este valor a los polígonos creados en el proceso de agrupamiento.

4.3 CAPA DE TIPO DE SUELO

Actualmente en el país se cuenta únicamente con una capa de tipo de suelo con órdenes y subórdenes, sin embargo para el actual estudio estos datos son insuficientes, ya que son necesarios datos más específicos de cada suelo.

Por este motivo se utilizan los datos de un muestreo puntual a nivel de país que publicó el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA), (2014) de la Universidad de Costa Rica. Los cuales, previa consulta, se modificaron para pasar de ser puntos a ser polígonos, aumentando su tamaño hasta obtener su zona de influencia.

Algunos de los datos necesarios para ingresar el perfil del suelo, no se encuentran en la base de datos del CIA, pero se calculan fácilmente con los porcentajes de textura del suelo que si se tiene por medio de estos datos. Para el cálculo de estas variables se utiliza la versión 6.02.74 del Soil Water Characteristics del USDA, el cual estima la capacidad de tensión del agua del suelo, conductividad y retención de agua basada en las propiedades físicas de textura del suelo. La fuente de los datos utilizados se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Fuente de datos para el tipo de suelo.

Base de datos CIA	Características de agua en el suelo
Grupo hidrológico	Capacidad de retención de agua en el suelo
# de capas y profundidad del suelo	Conductividad hidráulica
Densidad aparente	
Carbono orgánico	
Textura del suelo	

4.4 OBTENCIÓN DE DATOS DE LLUVIA Y CAUDAL

Desde los años 50 el ICE ha desarrollado una red de información por medio de la instalación de estaciones meteorológicas y de caudal en las principales cuencas del país, en la actualidad cuenta con 240 estaciones meteorológicas y 105 estaciones limnigráficas.

Las estaciones que se utilizan para la simulación, fueron seleccionadas por su ubicación en la parte alta de las subcuencas en estudio, y para la calibración se solicitaron caudales de dos estaciones limnigráficas, todas estas se muestran en la Figura 4.1. Se realiza una solicitud formal de las estaciones meteorológicas y de caudal a la institución.

Las estaciones Hacienda Guachipelín, La Fortuna, Río Naranjo con datos de precipitación y Bagaces con precipitación y temperatura; Rancho Rey y Rancho Horizontes con datos de caudal diario. Las estaciones de precipitación fueron seleccionadas debido a su ubicación y distribución uniforme, buscando datos en la cuenca media y alta. Existen más estaciones en la zona como se menciona en la Tabla 3.1, sin embargo por su cercanía con las seleccionadas no fue necesaria la solicitud de sus datos.

Las estaciones contienen diferentes periodos de tiempo, y como se muestra en la Tabla 4.2 el rango de tiempo que comparten las estaciones meteorológicas va del año 1992 al año 2013, sin embargo existen periodos largos que no cuentan con datos ya sea de temperatura o de lluvia, los cuales son vitales para una óptima modelación. Se selecciona el periodo que comprende del 16 de octubre del 2007 al 1 de enero del 2013, debido a que este periodo cuenta con datos de caudal para realizar la calibración de las sub cuencas Río Piedras-San Jerónimo y Río Blanco con la estación limnigráfica de Rancho Horizontes, a pesar de esto la simulación se realiza desde el 1 de enero del 2005, para dar un periodo de ajuste de los datos iniciales.

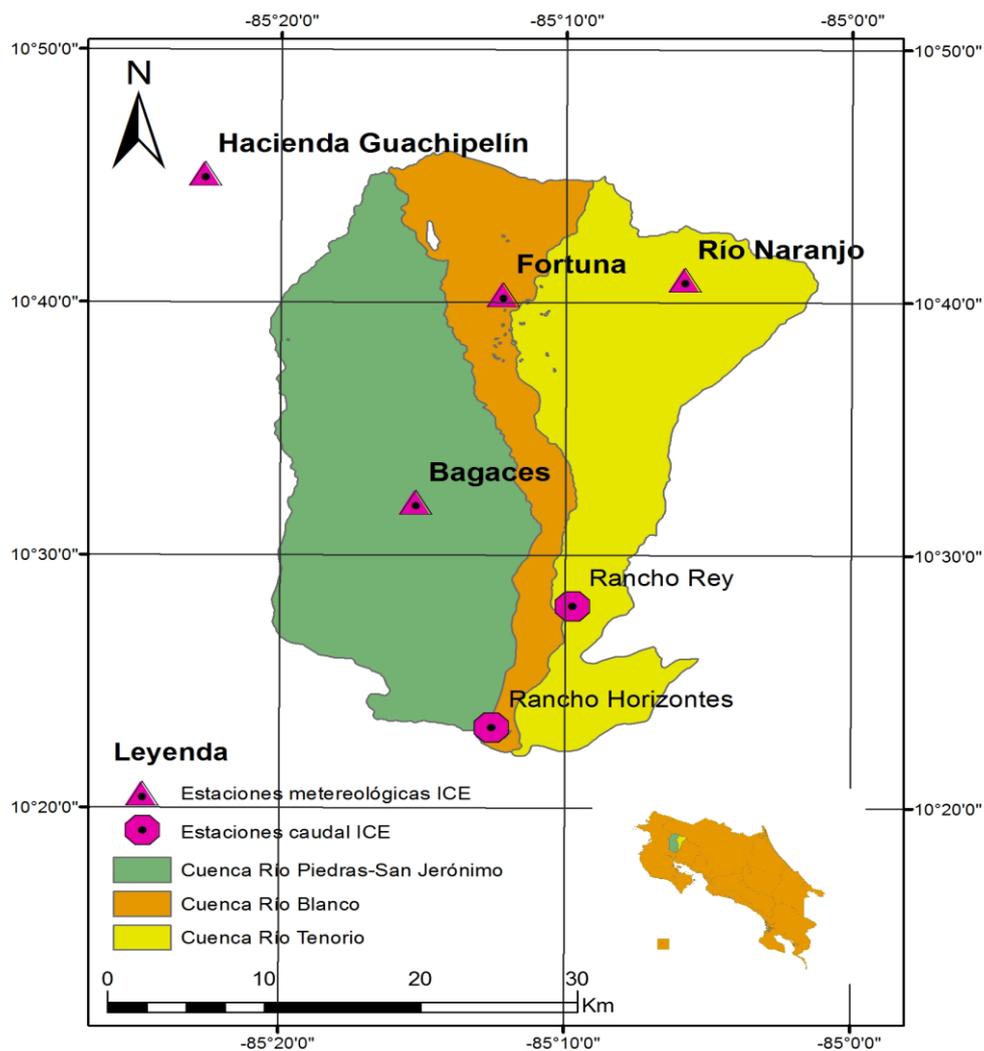


Figura 4.1. Estaciones utilizadas para el estudio.

Tabla 4.2. Estaciones del ICE.

Estación	Dato	Fecha inicio	Fecha final	Elevación (msnm)
Hacienda Guachipelín	Precipitación	1976	2013	535
Bagaces	Precipitación	1976	2013	95
	Temperatura	1992	2013	
La Fortuna	Precipitación	1976	2013	433
Naranjo	Precipitación	1975	2014	466
Rancho Rey	Caudal	2000	2013	20
Rancho Horizontes	Caudal	2007	2013	24

La subcuenca Río Tenorio es modelada con el fin de verificar la calibración realizada para la zona. El periodo de modelación y verificación es de cinco años, comprendida entre el 1 de enero del 2004 al 31 de diciembre del 2011 ya que los datos de caudal se encuentran bastante completos en este periodo.

El modelo está programado para aceptar únicamente los datos de una estación a la vez por simulación, lo que indica que a pesar de contar con datos de cuatro estaciones, solo es permitido utilizar una. Por este motivo se realizan cuatro simulaciones con cada una de las estaciones, con el fin de evaluar la influencia de lluvia de cada estación en los caudales de las cuencas en estudio.

4.5 USO DEL SWAT

Una vez que se cuenta con la información necesaria para simular en SWAT, se procede a seguir los pasos para poder realizar la simulación. El modelo utilizado brinda la facilidad de ir adjuntando cada capa con su información en orden según es solicitada, y en el caso de que exista un error en la lectura del archivo o los datos adjuntos a la capa, se muestra en una ventana.

Las pestañas del programa nos guían en el proyecto de la siguiente manera

- Creación del proyecto

Esta sección es introductoria para la creación del proyecto, en ella se crea y se nombra el proyecto, además de seleccionar la carpeta donde se alojan todos los archivos que genera la simulación.

El proyecto se realiza para las dos diferentes cuencas, por lo tanto se crean dos archivos distintos con la simulación de cada cuenca.

En esta pestaña también se encuentra las opciones para guardar el proyecto, abrir un proyecto antiguo y las opciones generales de modificación de un proyecto.

- Delimitación de la cuenca

Se introduce el Modelo de Elevación Digital (DEM) y gracias a él, SWAT hará lectura, pixel por pixel, de la elevación del terreno, una vez que realiza el proceso de lectura señalan los distintos cauces del agua en conjunto con las salidas de cada uno, sin embargo, si se desea agregar algún punto de salida el modelo da la opción de hacerlo. Posteriormente se selecciona el punto de concentración a partir

del cual se crea la cuenca y el modelo se encarga de delimitarla por medio de la información contenida en cada pixel. Estos puntos se agregan donde se encuentran las estaciones de Rancho Horizontes y Rancho Rey, las que cuentan con datos de caudal.

Finalmente se puede realizar una consulta de tipo topográfico sobre los datos de la cuenca, además del área que abarca y sus elevaciones.

- Creación de HRU

Como siguiente paso, se ingresan los datos de cobertura de la tierra a modo de capas de polígonos creados con las imágenes Landsat y se le asigna un uso de suelo de la base de datos que contiene el modelo, es así como cada uso de suelo tiene un nombre asignado en SWAT, cada selección de cobertura de suelo tiene asignados valores predeterminados de número de curva y rugosidad de Manning, también cuenta con diversos valores que podrían resultar de importancia para otro tipo de estudios, como transporte de sedimentos y de nutrientes.

De la misma manera se ingresa el mapa de tipo de suelo, asignándole a cada polígono de suelo un nombre de la base de datos, que en este caso se modificó para ingresar nuevos suelos con las características de la región. Esta incorporación de la base de datos se realiza en la pestaña Edit SWAT Input, que se comentará más adelante.

Finalmente se hace una clasificación sobre cómo se desea que se hagan los grupos de HRU por medio de la pendiente, en este caso para el actual estudio no se seleccionan distintos rangos de pendiente, sino que toma todo el rango de pendientes como un valor, por lo que se formarán menos HRU.

Una vez que se ingresan estos datos, el modelo crea capas con las características de los suelos que fueron seleccionados y finalmente crea los HRU.

- Datos meteorológicos

En esta sección se ingresan los archivos de texto con los datos de las estaciones meteorológicas. Para realizar esta función desde la pestaña "Write Input Tables", en la opción "Weather Stations" se llama a un archivo de texto que anida el nombre, la ubicación y altitud de cada una de las estaciones, que en realidad son los distintos archivos que contienen los datos diarios de cada estación. El

modelo lee este archivo "madre" y busca el registro que se describe en él, solamente aceptando una estación de temperatura y precipitación por modelación.

En el actual estudio se utilizaron datos de precipitación y temperatura máxima y mínima diarios suministrados por el ICE, a partir del día 1 de enero de 2005 al 1 de enero del 2013, cumpliendo con un periodo de 8 años.

Los faltantes de datos de precipitación y temperatura son rellenados por el modelo en base de los datos que se ingresan en la sección "Edit SWAT Input".

Posterior al ingreso de datos meteorológicos, en la opción "Write SWAT Input Tables", se procesan todos los datos que se han ingresado hasta el momento, creando las tablas que utiliza el modelo para recrear el escenario que se modelará.

- Edición de datos

La opción de editar los datos es de los puntos más importantes en el caso de este estudio, ya que permite adaptar las condiciones de suelos y condiciones ambientales a las existentes en la cuenca.

En la tabla de tipos de suelo se ingresan 14 suelos con las características mencionadas anteriormente del muestreo del Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA), posteriormente cada uno de estos suelos serán los que se asignen a los polígonos, ya que quedan en la memoria de la base de datos.

También se realizan ajustes a la cuenca en este apartado, como los valores de rugosidad de los suelos y los canales, los ajustes de tamaño y pendiente de canal. Se ingresan los datos de fracción de percolación del suelo y datos que permiten la infiltración característica de la zona.

Se ingresan valores meteorológicos que resultan de apoyo para que el modelo rellene datos e incluso tome mediciones como la evapotranspiración, ya que se ingresan los datos de radiación medida de la zona. En este apartado también se hace la selección del método de evapotranspiración, debido a que se cuenta con datos de temperatura máxima y mínima y se ingresan los datos de radiación, se selecciona el método por Hargreaves-Samani.

- Simulación

Finalmente se realiza la simulación en la pestaña de SWAT Simulation en la opción Run SWAT, ingresando el rango de tiempo en el que se desea realizar la simulación y algunos últimos ajustes que dependen del sistema computacional con que se cuenta.

Para el proyecto en estudio se realizan dos simulaciones, una de ellas cubrirá dos subcuencas, la subcuenca Río Piedras-San Jerónimo y Río Blanco, esto porque solamente se cuenta con una estación limnigráfica que abarca la totalidad de las dos subcuencas, la estación de la que se habla es Rancho Horizontes. La segunda simulación es de la subcuenca del Río Tenorio la cual cuenta con la estación limnigráfica de Rancho Rey para corroborar datos de caudal.

Entre los datos brindados por el ICE se encuentran dos estaciones limnigráficas de interés para el estudio, Rancho Horizontes y Rancho Rey, su información resulta de vital utilidad para la calibración de las subcuencas Río Piedras-San Jerónimo y Río Blanco, y para la comparación de datos de la subcuenca Río Tenorio, la delimitación de las cuencas en estudio se basan en dichas estaciones.

La estación de Rancho Horizontes se encuentra en la zona baja de la confluencia de las subcuencas Río Piedras-San Jerónimo y Río Blanco, por lo que se toma el sitio como punto de partida para la delimitación tomando las dos subcuencas juntas, esto permite hacer un estudio del área en una sola subcuenca delimitada por el modelo, que se nombrará de aquí en adelante como **Cuenca 1**. A partir de la estación de Rancho Rey se delimita la segunda subcuenca en estudio, la de Río Tenorio (**Cuenca 2**), éstas se muestran en la Figura 5.1, con los respectivos cauces.

4.6 CALIBRACIÓN

Una vez realizada la primera simulación se calcula el porcentaje de error con el método Nash-Sutcliffe, para comparar qué tan certeros son los caudales simulados por el modelo SWAT, en comparación con los registros brindados por el ICE en el mismo periodo. Según se había mencionado el coeficiente de Nash-Sutcliffe debe tener un valor cercano a 0,5 para tener un error satisfactorio de los datos de simulación, un valor de Nash de 1 da como resultado una evaluación excelente para el modelo.

Se procede a realizar la calibración variando los valores de CN en rangos de $\pm 10\%$ en los distintos usos de suelo de la cuenca en estudio para un periodo de tiempo de 5 años, con el fin de ir

aproximando el coeficiente de Nash-Sutcliffe al valor deseado. Para tomar la decisión de si aumentar los valores de CN o disminuirlos se comparan los datos de caudal, si los datos de caudal de la simulación son mayores que los medidos en campo, el CN se disminuirá y si son menores, el CN aumentará, esto gradualmente como ya se mencionó para ir disminuyendo el error.

Si el coeficiente de Nash no llega al valor buscado con la calibración del CN, se procede a variar el valor de capacidad de agua disponible (SOL_AWC) el que se encuentra entre 0 y 1, para afinar los caudales base y picos.

Según los estudios consultados el valor de factor de compensación de evaporación (ESCO) también calibra el modelo para adaptarlo a la zona, este varía en un rango de 0 a 1, y permite remover agua del suelo en forma de evaporación para así disminuir los caudales base, de ser necesario.

De ser necesario se modifican valores que permiten mejorar el movimiento de agua a través del suelo, para adaptarlos a valores reales de la zona.

Finalmente se realizan ajustes en el acuífero profundo como la profundidad a la que se encuentra, profundidad final, fracción de percolación del suelo y coeficiente de infiltración. Además de dimensionar los ríos, bajo una estimación.

Una vez disminuido el error del coeficiente de Nash-Sutcliffe, se procede a comparar los patrones de caudal reales y los simulados, para poder asegurar que el modelo predice las condiciones reales de la cuenca 1.

La calibración realizada es utilizada con los mismos valores para la cuenca 2, usualmente en cuencas donde no hay estaciones limnigráficas, se calibra un modelo para una cuenca cercana y con condiciones similares donde si existen datos de caudal, posteriormente se utiliza el modelo en la cuenca necesaria. En este caso la cuenca 2 si se cuenta con datos de caudal, por este motivo se utiliza la calibración de la cuenca 1 para observar el comportamiento del modelo en la cuenca aledaña, y corroborar si se ajusta.

4.7 MODELACIÓN DE ESCENARIOS.

Una vez que se realiza la calibración obteniendo un coeficiente de Nash aceptable para la cuenca, los dos escenarios propuestos se realizan para posibles condiciones dentro de 10 años en la zona

estudiada. El primero se basa en el cambio de cobertura que se da a nivel país y que afecta tanto las zonas bajas de las cuencas, sobre todo en épocas lluviosas.

Uno de los mayores problemas presentes en la mayoría de cuencas es el cambio de cobertura o uso de suelo. Los centros poblacionales aumentan, las áreas boscosas disminuyen y esto genera mayor escurrimiento de aguas provocando inundaciones en época lluviosa. Según el estudio realizado por Cordero Montoya, Acevedo Mairena, & Calvo Alvarado (2008), "Cambio de la cobertura de la tierra para el Área de Conservación Tempisque 1998-2003, Guanacaste, Costa Rica.", en la zona se encuentra un incremento de zonas agrícolas y pastizales, en un orden de 8,7% y 5,5% respectivamente, y la zona boscosa mantiene una reducción del 5% cada 5 años. Se propone un cambio de cobertura de acuerdo al artículo citado.

Tabla 4.3. Escenario de cambio de cobertura del suelo

	Actual	Escenario	Cambio de cobertura %
Construcción	3119,90	3459,69	10
Cultivo	3231,57	3727,02	13
Charral	6537,07	7756,88	16
Pasto denso	13816,26	15530,27	11
Bosque denso	11513,89	10687,30	-8
Suelo descubierto	10159,10	8543,34	-19
Agua	4086,34	3888,06	-5
Bosque poco denso	10829,11	9700,68	-12

El escenario que se propone evalúa el cambio mostrado en Tabla 4.3. Escenario de cambio de cobertura del suelo para dentro de 10 años, es decir el año 2025, con el fin de estudiar el comportamiento del caudal en el río Piedras de la Cuenca 1 en estudio. De acuerdo a la realidad se aumentan las zonas residenciales en un 10 %, el área de agua y suelos descubiertos ceden espacio a los cultivos y pastos aumentando de acuerdo a los datos citados y el área boscosa disminuye en un promedio de 10 %.

El escenario 2 se encuentra fundamentado en el tema de calentamiento global, el cual es uno de los temas sensibles de nuestra época, comentado y analizado con especial interés en la actualidad. Según Hesselbjerg Christensen & Kumar Kanikicharla (2013) del panel Intergubernamental de Calentamiento Global (IPCC) desde los años 50 el incremento de la temperatura ha ido en aumento, representando un 0,78°C en los últimos 9 años.

Es así como para la zona de Centro América y el Caribe se espera un aumento promedio de 0,9 °C para el 2035, para el escenario que se desarrolla se realiza un incremento de 0,45 °C en cada dato diario, mínimo y máximo, con el fin de representar el comportamiento de caudales con temperaturas atmosféricas del año 2025. Además se esperan disminuciones de hasta un 10 % en las precipitaciones de la zona, por lo que se realiza una disminución de las lluvias reportadas en los datos.

Capítulo 5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 DELIMITACIÓN DE LA CUENCA

Delimitadas las dos cuencas en estudio se calcula el área de cada una de ellas y se compara con las cuencas de la base de datos del Atlas 2008, las cuales han sido corroboradas con las curvas de nivel de las hojas cartográficas de la zona. Como se muestra en la Tabla 5.1 existe una leve diferencia de área con respecto a las cuencas calculadas por SWAT y las de la base de datos, sin embargo el error calculado es menor del 0,28 %, de todas maneras se hace la anotación debido a que al observarlas juntas se muestran algunas diferencias.

La cuenca de la base de datos fue delimitada por medio de curvas de nivel a escala 1:50 000 y la calculada por SWAT, se realizó por medio de la lectura de pixeles con datos de altura del sensor Aster Gdem, es decir la fuente de donde nació cada capa es distinta. A pesar de que el DEM utilizado se mejoró al resaltar las zonas de ríos, se pueden encontrar zonas con planicies donde la información no esté muy precisa, por lo que el modelo no encuentra la diferencia de alturas, además una vez que se realiza la delimitación de cuenca no cuenta con una opción de edición para corregir posibles errores, por este motivo el DEM se procesa lo mejor posible antes de iniciar la modelación.

Tabla 5.1. Área de las cuencas según la base de datos y SWAT.

Área (km ²)			
	Base de datos	SWAT	Error (%)
Cuenca 1	634,63	634,67	0,0063
Cuenca 2	297,06	296,22	0,2828

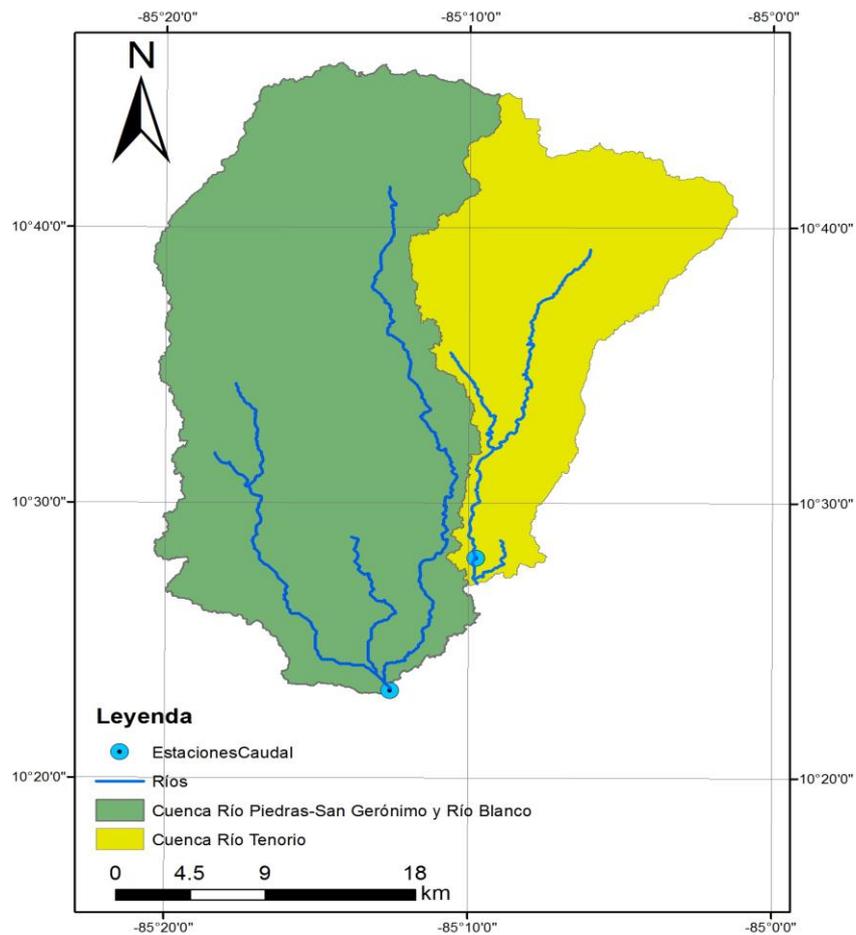


Figura 5.1. Cuencas en estudio delimitadas por SWAT.

5.2 USO DE SUELO

La clasificación de cobertura por medio de imágenes multi-espectrales de Landsat, 2014, se subdivide en 8 categorías, donde se observan pequeñas áreas donde es imposible determinar el uso de suelo debido a que aparentan zonas sombreadas, estos sitios coinciden o se aproximan a áreas cubiertas por agua por lo que se funden dentro de esta cobertura.

En la Tabla 5.2 se muestra el nombre asignado por medio de la base de datos del SWAT, el cual cuenta con valores que son significativos para la modelación hidrológica en estudio, en especial los valores de número de curva (CN) los cuales influyen directamente sobre el caudal saliente de la cuenca.

Tabla 5.2. Uso de suelo asignado en SWAT.

Uso de suelo	SWAT	Siglas en SWAT	Numero de Curva			
			A	B	C	D
Agua	Water	WATR	92	92	92	92
Bosque denso	Forest Evergreen	FRSE	25	55	70	77
Bosque poco denso	Forest Deciduous	FRSD	45	66	77	83
Construcción	Urban	URBN	31	59	72	79
Cultivo	Agricultural Land- Close-grown	AGRC	62	73	81	84
Charral	Grarigue	GRAR	39	61	74	80
Pasto denso	Pasture	PAST	49	69	79	84
Suelo descubierto	Barren	BARR	77	86	91	94

Representado en la Figura 5.2 el uso de suelo de la zona es mayoritariamente pastos o charral, sin embargo también se encuentra gran extensión de bosques, esto se debe a que en la zona se ubican algunos parques nacionales que logran preservar las áreas. A pesar de ser un área agrícola en zonas cercanas, tiene poco porcentaje de cultivos y agua, en comparación con su área boscosa, además se observa que la cuenca también tiene una gran superficie de suelos descubiertos.

Es importante resaltar que el modelo es desarrollado para áreas de Estados Unidos, y a pesar de tener una base de datos muy completa, algunos valores se aplican para vegetación de este país. Es así como gran parte de la cuenca en estudio es clasificada como pasto denso en una especie llamada "Garriga" la cual se considera una especie de chaparral seco, de baja altura donde algunas zonas tienen suelos descubiertos, se considera una buena adaptación de gran parte de la cuenca en estudio, debido a las zonas donde se encuentra una vegetación seca, compuesta de pequeños arbustos leñosos y combinada con suelos desnudos.

La base de datos también cuenta con datos de bosque, sin embargo en la zona norte del continente se aprecia en su mayoría bosques de coníferas, por lo que se deduce que el área foliar que intercepta el agua de lluvia es menor que el de la cuenca estudiada ya que las hojas de los árboles en nuestro país son mucho más amplias y tupidas, esto nos indica que la evapotranspiración calculada puede llegar a ser levemente menor a la real, ya que el modelo simula un pequeño porcentaje de agua que llega al suelo.

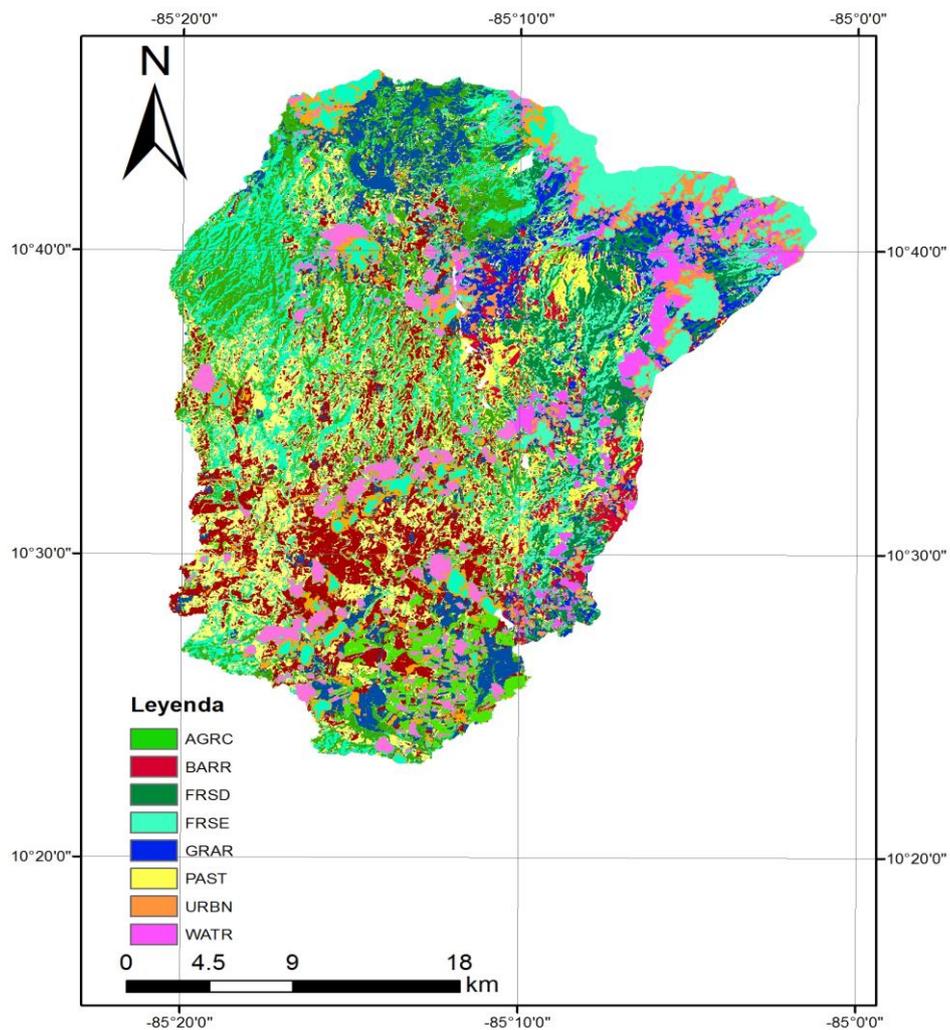


Figura 5.2. Uso de suelo de subcuencas en estudio, enero, 2014.

5.3 SUELOS

Los datos de suelo se han adaptado al muestreo de la base de datos del CIA, los cuales confirman suelos con buen drenaje en su mayoría, según se observa en la Tabla 5.3. Orden de suelos presente en la cuenca 1 y 2. El área cuenta con suelos de orden Inceptisoles en su mayoría y una parte de Entisoles que forman parte del grupo hidrológico A, según previa consulta a un profesional en agronomía que colabora con la recopilación de datos en el CIA, es decir cuentan con un excelente drenaje, también se encuentran gran cantidad de suelos con orden Ultisol, perteneciente al grupo

hidrológico B, y por último se cuenta con gran área de Vertisoles, suelos con pobre drenaje siendo parte del grupo hidrológico D.

Tabla 5.3. Orden de suelos presente en la cuenca 1 y 2.

	Cuenca 1 Área (%)	Cuenca 2 Área (%)
Inceptisol	37,98	65,29
Vertisol	26,43	13,26
Ultisol	20,33	15,59
Entisol	14,69	0,00
Andisol	0,57	5,86

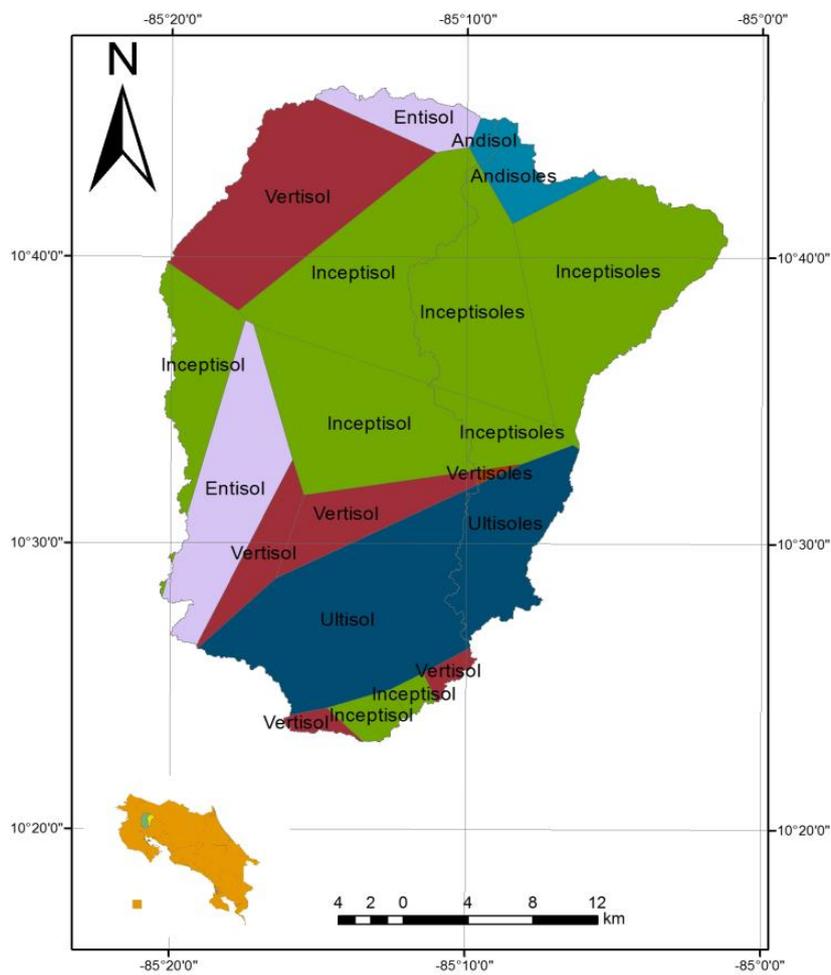


Figura 5.3. Orden de suelos presente en la cuenca.

Con un 78% de área cubierta de suelos con excelente drenaje, los datos confirman la información con que se contaba en un inicio, por lo que el movimiento de agua es continuo a través del suelo una vez que cae en forma de lluvia, deduciendo que el escurrimiento y el agua se mueven rápidamente en el suelo. En la Figura 5.3, se observa la distribución de suelos en las cuencas en estudio.

5.3.1 Características generales de la cuenca 1

La cuenca 1 presenta una pendiente promedio de 0,155 m/m, y cobertura de suelo en gran parte pastos y charrales con un 21,80 % y 10,34 % respectivamente (Tabla 5.4), sin embargo la totalidad de los diversos bosques es aún mayor, debido a la presencia de parques nacionales en el área, sobre todo en las zonas altas de la cuenca, que es precisamente el sitio donde se presenta mayor precipitación, debido a estas características la infiltración de la zona es alta.

Tabla 5.4. Uso de suelo en la cuenca 1.

	Área (km ²)	% área
Pasto	138,38	21,80
Bosque denso	115,30	18,17
Bosque poco denso	108,55	17,10
Suelo descubierto	102,02	16,07
Charral	65,64	10,34
Agua	41,06	6,47
Cultivos	32,37	5,10
Construcción	31,36	4,94

El modelo subdivide la cuenca en 7 áreas según sus ríos, cada una con su respectivo cauce mostrados en la Figura 5.4, cada una de estas es dividida en pequeñas áreas (HRU) agrupadas por suelos, cobertura de suelo y pendiente igual, en total la cuenca ha sido dividida en 293 HRU, las cuales se subdividen como se muestra en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Características de las subcuencas dentro de la cuenca 1.

Área	Área (km ²)	#HRUs	Pendiente (m/m)	Rugosidad	CN
1	68,94	24	0,166	0,114	43,47
2	106,08	48	0,188	0,112	42,59
3	144,43	78	0,132	0,089	51,47
4	118,25	48	0,131	0,075	57,52
5	22,89	10	0,116	0,116	43,03
6	192,76	77	0,171	0,105	45,61
7	87,43	8	0,153	0,115	43,20

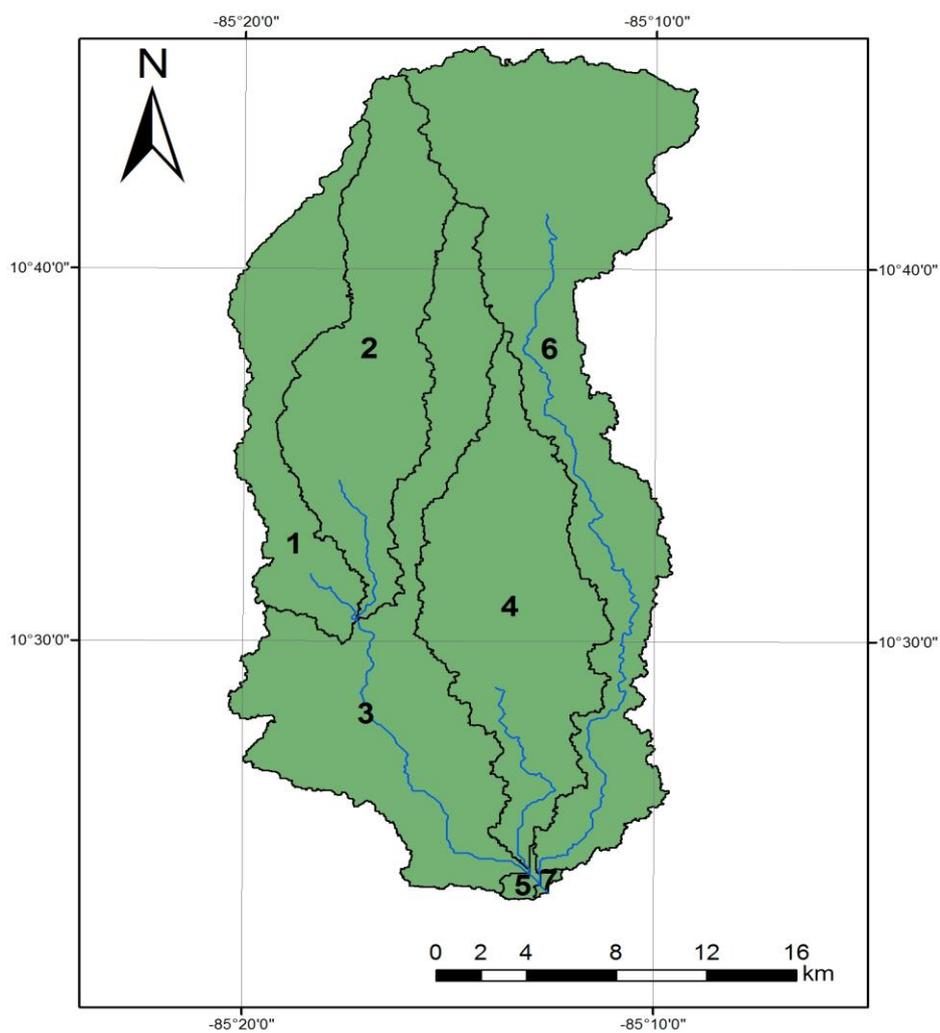


Figura 5.4. Áreas y ríos dentro de la cuenca 1.

En el resumen de las características de cada área, se determina que la mayor variedad de combinaciones de coberturas de suelo y tipos de suelo se encuentran en las áreas 3 y 6, esto se puede deber a su tamaño, pero sobre todo a la extensión que cubren a lo largo de toda la cuenca, esta característica se resalta en el área 6 que cubre desde la parte baja donde se encuentran grandes áreas de suelo descubierto y cultivos, hasta la zona boscosa alta, todo esto en suelos de orden Andisol, Inceptisol y Ultisol.

El área 1 a pesar de tener gran extensión, mantiene únicamente 24 hru, esto se respalda por dos motivos, primero que es una zona mayoritariamente boscosa, confirmado en sus altos valores de rugosidad y número de curva en promedio bajos, y segundo como se observa en la Figura 5.3, únicamente hay presencia de suelos Vertisol e Inceptisol.

En la Tabla 5.6 se muestran los datos de cada canal de río dentro de la cuenca, el dato de longitud es calculado por el modelo, por medio de los datos en el modelo de elevación digital, la profundidad y las pendientes se calculan por medio de las curvas de nivel, la n de Manning son estimados por medio de las imágenes en las Figuras 5.5. y 5.6., utilizando la Tabla 2.5.1 del libro Hidrología Aplicada de Ven te Chow. Se determina que en la cuenca alta los ríos se mantienen limpios y rectos como se observa en la Figura 5.5, y en la cuenca alta se observan ríos con obstáculos como piedras y más sinuosos, por lo que su rugosidad aumenta a 0,08.



Figura 5.5. Río Potrero, zona alta de la cuenca 1.



Figura 5.6. Río Piedras, zona baja de la cuenca 1.

Nuevamente por su gran extensión el área 6, es la que mantiene la mayor pendiente en su canal, ya que la recorre completamente, desde la zona alta hasta la más baja, esto seguido por el canal 1 que se encuentra en la zona media de la cuenca donde se puede corroborar en la Tabla 5.5 que es de las áreas con mayor pendiente, además de ser un canal relativamente corto. Las áreas 5 y 7 cuentan con canales con poca pendiente por su ubicación en la parte baja de la cuenca donde el terreno es más plano.

Tabla 5.6. Datos del canal de cada subcuenca.

Canal	Longitud (km)	Profundidad promedio (m)	Ancho promedio(m)	Pendiente (m/m)	n Manning
1-Río Potrero	3,8	1,5	5	0,0104	0,030
2- Río Piedras	8,4	1,5	5	0,0047	0,030
3- Río Piedras	18,8	2,0	20	0,0021	0,050
4- Río San Jerónimo	13,2	2,0	20	0,0015	0,050
5- Río Piedras	0,8	2,0	22	0,0013	0,080
6- Río Blanco	45,1	1,8	15	0,0106	0,050
7- Río Piedras	0,5	2,0	25	0,0019	0,080

5.3.2 Características generales de la cuenca 2

La cuenca 2 se subdivide en 5 áreas, como se aprecia en la Figura 5.7 de las cuales se toma en cuenta para el estudio las primeras 3, debido a que la salida del río es donde encontramos la estación limnigráfica de Rancho Rey. Por lo tanto las características generales se dan enfocadas en estas.

La cuenca 2 se caracteriza principalmente por coberturas con bosques, ya que más del 50% de la cuenca se encuentra conformada por los mismos, esto contribuye con la infiltración de la zona. Si la

comparamos con la cuenca 1, el área de construcción aumenta casi al doble y los cultivos disminuyen significativamente. (Tabla 5.7)

Tabla 5.7. Uso de suelo en la cuenca 2.

	Área (km ²)	% de área
Agua	30,98	10,54
Bosque denso	76,02	25,87
Bosque poco denso	59,08	20,10
Cultivo	3,07	1,05
Charral	37,24	12,67
Pasto	38,86	13,22
Suelo descubierto	19,98	6,80
Construcción	28,64	9,75

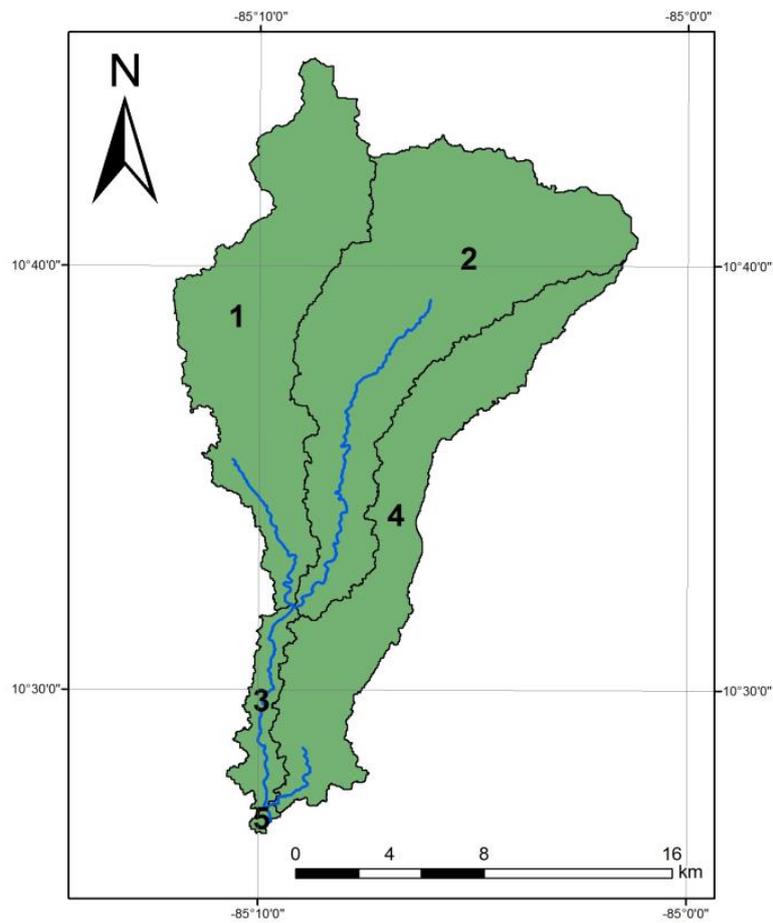


Figura 5.7. Áreas y ríos dentro de la cuenca 2.

La pendiente promedio según se observa en la Tabla 5.8, es superior a la de la cuenca 1, por lo que se esperan tiempos de concentración menores. En las zonas altas de la cuenca se encuentran conformadas por bosque principalmente, por este motivo el área 1 y 2 mantienen números de curva inferiores a la subcuenca 3, la que se mantiene en la zona baja donde se encuentran gran cantidad de cultivos y suelos descubiertos.

Una vez más se observa que el área 1 junto con la 2 tienen mayor cantidad de HRU, por tener forma alargada e incluir diversidad de alturas.

Tabla 5.8. Características de las subcuencas dentro de la cuenca 2.

Área	Área (km ²)	#HRUs	Pendiente (m/m)	Rugosidad	CN promedio
1	9009,03	44	0,222	0,129	47,88
2	12231,12	40	0,248	0,132	48,24
3	1173,65	8	0,170	0,112	52,12
4	6889,93	31	0,174	0,123	51,24
5	23,54	7	0,151	0,098	53,89

En la Tabla 5.9 se observa que las áreas 1 y 2 mantienen altas pendientes en comparación a la 3, la cual entra en una zona con mayores planicies. También en esta cuenca se mantienen los patrones de la cuenca 1 con respecto a la rugosidad, ya que las zonas altas de los ríos no hay tantos obstáculos como en la zona baja, la que se observa en la Figura 5.8. Por este motivo los ríos arriba mantienen un coeficiente de rugosidad de Manning menor que en la zona baja.

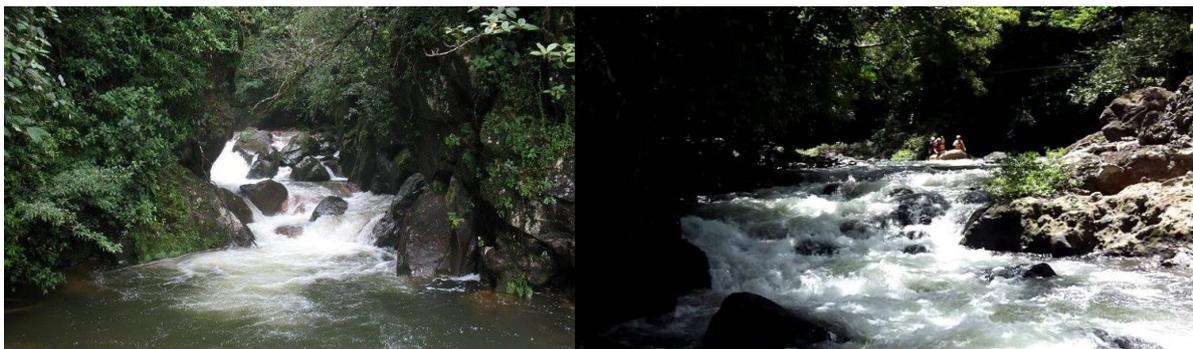


Figura 5.8. Ríos Cuipilapa y Tenorio.

Tabla 5.9. Datos del canal de cada subcuenca.

Canal	Longitud (km)	Profundidad (m)	Ancho (m)	Pendiente (m/m)	n Manning
1- Río Cuipilapa	9,1	1,5	5,0	0,0154	0,03
2- Río Tenorio	19,3	1,5	5,0	0,0148	0,03
3- Río Tenorio	10,8	2,0	20,0	0,0062	0,05
4- Río sin nombre	4,5	2,0	20,0	0,0016	0,05
5- Río Piedras	0,3	2,0	22,0	0,0097	0,08

5.4 CALIBRACIÓN CUENCA 1

Se decide realizar una simulación con los datos originales, es decir los datos que el modelo coloca por “defecto” con la estación La Fortuna, para analizar los datos y a partir de ahí comenzar a realizar la calibración. Es de esta manera se obtiene la Figura 5.9, donde se observa un patrón correcto de lluvias-caudal, sin embargo los picos se elevan de sobremanera, y la disminución de caudal del río se da lentamente a lo largo de varios días, factores que se deben corregir para adaptar mejor la simulación a los datos observados. El coeficiente de Nash para esta simulación es de -1,62, un valor bastante alejado del deseado.

Se adaptan los valores de suelos, cobertura vegetal, datos climatológicos promedio y características de los canales de cada subcuenca delimitada por el modelo, para así ajustarlos a la realidad de la zona.

Con respecto a los suelos, la conductividad hidráulica (SOL_K) es aumentada de manera que el agua se infiltre rápidamente al manto acuífero, disminuyendo la cantidad de agua que llega al río por escurrimiento, esto debido al alto valor de infiltración de la zona. Los valores finales de los 55 perfiles de suelo con que se cuenta, se aumentan de manera que el mínimo se encuentra en 0,9 mm/h con un valor promedio de 87 mm/h y una desviación estándar de 134,1 mm/h. Según Leiva, Mata, Rocha, & Gutiérrez Soto (2009), los valores de conductividad hidráulica para la zona de Guanacaste se encuentran en un máximo de 97,7 mm/h para suelos con orden Inceptisol, incluso se menciona que los suelos Ultisoles llegan hasta valores de 414,1 mm/h de conductividad, lo que indica que los valores calibrados se encuentran dentro de un rango aceptable.

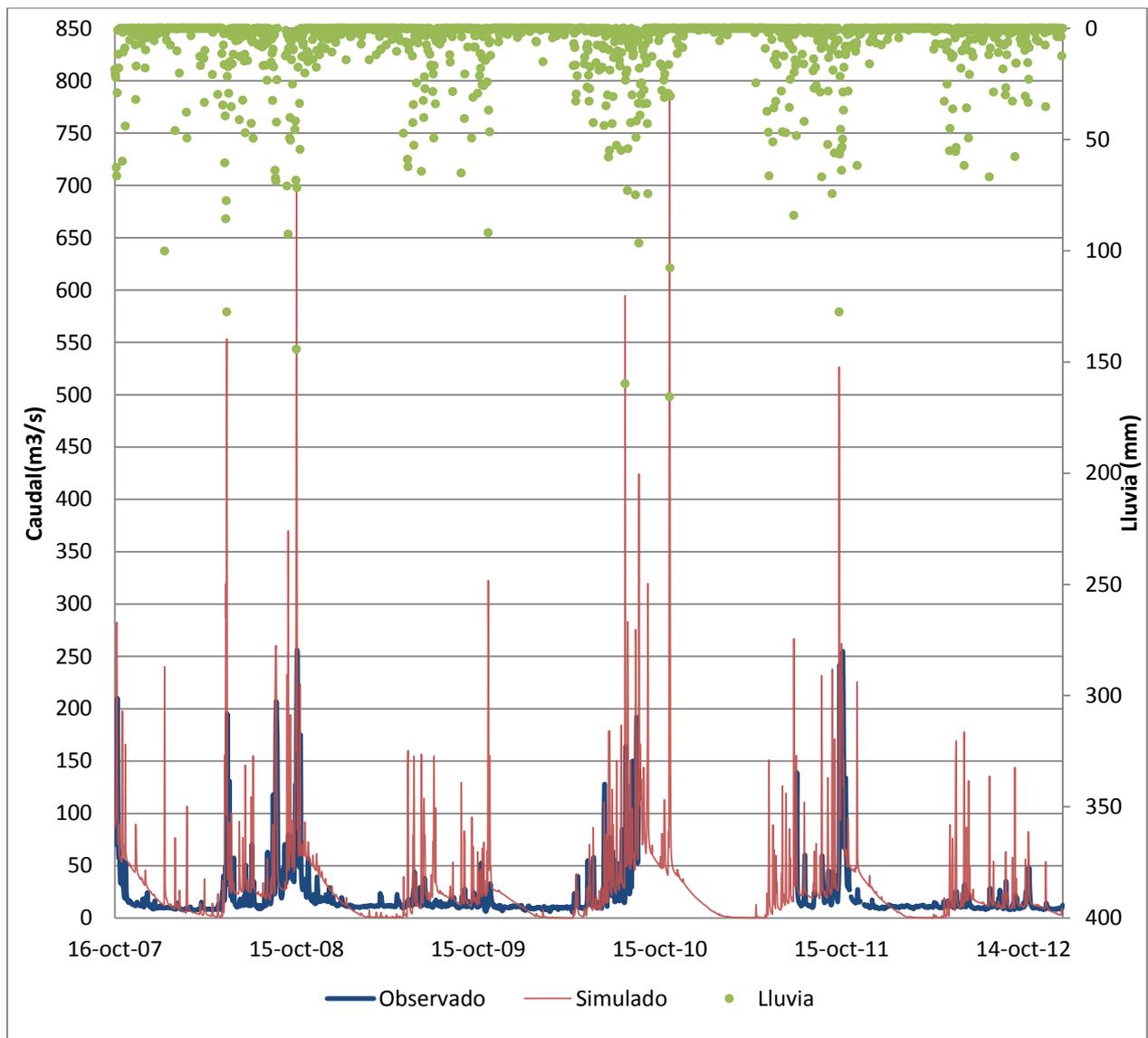


Figura 5.9. Hidrograma de Cuenca 1 con precipitación reportada en la Fortuna con datos iniciales.

Precisamente debido al alto valor de infiltración de los suelos y tomando en cuenta que la mayoría de suelos de la cuenca se mantienen en los grupos hidrológicos A y B, la fracción de percolación del acuífero profundo (RCHRG_DP) también es aumentada provocando mayores aportes de agua al manto acuífero y disminuyendo los caudales base del río.

El valor del retraso de llegada de aguas subterráneas (GW_DELAY) es un valor que no es posible calcular, solamente se puede calibrar por medio de iteraciones del programa (Douglas-Mankin et al., 2010). Se determina que el valor que se ajusta a la cuenca en estudio es de 500 días, lo que permite un tiempo de percolación del agua del suelo superficial al manto acuífero adecuado.

El agua es movida del acuífero superficial a la zona de raíz por un coeficiente de re-evaporación (GW_REVAP), lo que permite sustituir rápidamente la zona donde el agua es evaporada del suelo. Este coeficiente GW_REVAP se mantiene alto, para simular las condiciones de altas temperaturas que se encuentran en la zona de Guanacaste y remueven rápidamente el agua del suelo, sustituyendo estos poros con agua del acuífero.

El factor de compensación de evaporación (ESCO) es disminuido para así lograr una mayor evaporación, y reducir el recurso hídrico que interactúa con el suelo, esta modificación trae una leve disminución de caudales presentes.

Tabla 5.10. Datos calibrados en SWAT.

	Inicial	Final	Rango	
			Min	Max
ESCO	0,95	0,1	0	1
SOL_K (mm/h)	Anexo 1	Anexo 1	0	2000
RCHRG_DP	0,05	0,9	0	1
GW_DELAY (días)	31	500	0	500
GW_REVAP	0,02	0,2	0,02	0,2

Tabla 5.11. Número de curva inicial final de la calibración

Uso de Suelo	Numero de Curva			
	A	B	C	D
Agua	92	92	92	92
Bosque Denso	25	55	70	77
Bosque poco denso	25	55	70	77
Construcción (1012 m²)	61	75	83	87
Cultivo	62	73	81	84
Charral	39	61	74	80
Pasto denso	49	69	79	84
Suelo descubierto	77	86	91	94

El número de curva se mantiene con los valores por defecto del SWAT a excepción del bosque poco denso y la construcción, los que se modifican de acuerdo a la tabla 5.5.2 de Chow et al., 1994, estos son mostrados en la

Tabla 5.11, los cuales representan valores razonables para la zona de estudio. Sin embargo, en la cobertura se corrigen los valores de n de Manning como se muestra en la Tabla 5.12, con apoyo de la tabla de Chow et al., 1994.

Tabla 5.12. Valores de rugosidad de los suelos de la cuenca.

Cobertura	n Manning
Agua	0,01
Bosque Denso	0,20
Bosque poco denso	0,20
Residencial	0,03
Cultivo	0,05
Charral	0,12
Pasto denso	0,10
Suelo descubierto	0,045

5.4.1 *Tabla de apoyo para relleno de datos meteorológicos*

Durante 15 días las estaciones meteorológicas no cuentan con datos de lluvia, en el mes de setiembre del año 2008, mientras que la temperatura no se reporta en 119 días a lo largo de 5 periodos en distintos años. El modelo cuenta con datos de apoyo para rellenar estos valores meteorológicos faltantes, los que se modifican para ajustarlos a las condiciones de la cuenca. Los datos ingresados al modelo para rellenar los datos faltantes se observan en la Tabla 5.13, con sus respectivas fuentes de datos.

Tabla 5.13. Datos de apoyo insertados al modelo SWAT.

Parámetro	Datos												Fuente
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	
TMPMX	32,0	33,0	34,5	34,8	33,6	31,9	32,1	32,1	31,5	31,3	31,0	32	Climwat, 2006
TMPMN	21,0	21,6	22,0	23,2	22,8	22,4	22,5	22,4	22,3	22,3	22,0	21,0	Climwat, 2006
TMPSTDMX	1,22	2,38	1,14	1,30	2,15	1,60	1,24	1,02	1,30	1,98	1,49	1,0	Calculado con datos del ICE
TMPSTSMN	1,76	1,81	1,57	1,78	1,16	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,50	1,50	Calculado con datos del ICE
PCPMM	2,0	11,0	16,0	45,0	225	250	135	218	315	342	117	16,0	Climwat, 2006
PCPSTD	1,8	2,0	0,9	11,2	22,2	9,57	7,8	20,9	17,1	23,1	9,4	9,4	Calculado con datos del ICE
PCPSKW	3,3	4,19	2,81	4,57	3,44	1,93	2,4	1,95	1,97	1,22	4,3	2,6	Calculado con datos del ICE
PR_W1	0,95	0,95	0,95	0,9	0,8	0,7	0,7	0,5	0,5	0,4	0,6	1,0	Atlas Climatológico Costa Rica
PR_W2	0,1	0,05	0,05	0,1	0,2	0,3	0,3	0,5	0,5	0,6	0,4	0,1	Atlas Climatológico Costa Rica
PCPD	4,0	3,0	3,0	4,0	10,0	15,0	14,0	16,0	17,0	18,0	8,0	5,0	Atlas Climatológico Costa Rica
RAINHHMX	5,0	5,0	5,0	13,3	31,6	30,6	23,9	29,4	36,4	26,0	18,0	5,0	(Gunther Vahrson & Arauz, 1993)
SOLARAV	9,4	12,3	16,4	19,4	23	25	24,5	23,1	19,2	15,5	11,0	9,1	Climwat,2006
WNDVAV	2,3	2,4	2,1	1,8	1,0	1,8	1,0	0,9	0,7	0,7	1,0	1,6	Climwat, 2006

5.5 MODELACIÓN HIDROLÓGICA CUENCA 1

Una vez calibrados los parámetros se realiza una simulación para cada estación dentro de cada cuenca, tomando en cuenta las zonas de influencia mostradas en la Figura 5.10, calculadas con polígonos de Thiessen con el fin de observar la influencia y aporte que tiene cada estación al punto de concentración. De esta forma la estación de Bagaces tiene un peso de 61%, Fortuna de 35% y Hacienda Guachipelín de 2,70% sobre la cuenca 1. En el caso de la Cuenca 2 se tiene un peso de 56,81 % para la Estación de Río Naranjo, 20,26% para la Fortuna y de 22,93% para Bagaces.

Como el interés se centra en la cuenca 1, se realiza una simulación para cada una de las estaciones que influyen la zona, es decir, las estaciones de Bagaces, Hacienda Guachipelín y Fortuna. Una vez realizado el estudio, se simula la cuenca 2 únicamente con la estación Río Naranjo, con el fin de analizar el comportamiento de los datos pre calibrados para zonas cercanas a la cuenca 1.

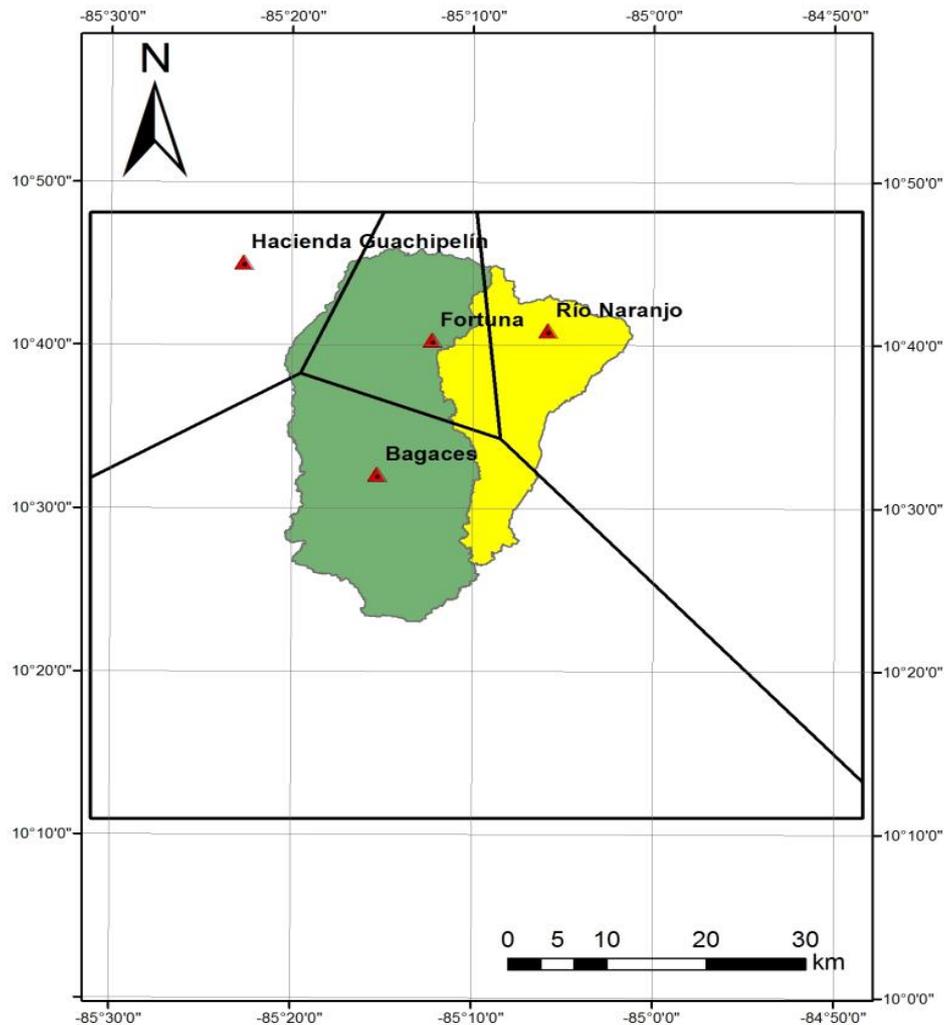


Figura 5.10. Área de influencia de cada estación meteorológica.

En la Tabla 5.14 se encuentran calculados los acumulados anuales de cada estación meteorológica utilizada en el estudio. El análisis del comportamiento de los caudales por influencia de cada una, es sustentado por varios fenómenos ocurridos por estas lluvias.

Las zonas de influencia de cada estación mantienen patrones que son determinantes en los comportamientos de la cuenca. Por ejemplo, en la parte media de la cuenca 1, se encuentra la estación de Bagaces, la cual a lo largo de todos los años en estudio es la que reporta menor cantidad de agua en forma de lluvia, esto indica que en las partes bajas de la cuenca los eventos de lluvia mantienen menor intensidad, mientras que en la parte alta la estación Naranjo reporta la mayor cantidad de lluvia, ya que recibe influencia del clima de la zona Norte que según el Instituto Meteorológico Nacional (IMN) (2009). Esta zona pertenece al régimen de precipitación del Caribe la que se mantiene lluviosa todo el año. Los datos de la estación Guachipelín obedecen al clima presente en el Pacífico Norte, el cual se mantiene más seco.

Si analizamos los datos anuales, todas las estaciones reportan su menor precipitación anual acumulada en el año 2012, año que es especialmente seco con un promedio de lluvia anual total de 1 258 mm entre todas las estaciones, en contraste con el 2007 que mantiene un promedio de 2 787 mm, lo cual representa más del doble. El 2009 también mantiene precipitaciones bajas, en un orden de 1 792 mm en promedio anual entre todas las estaciones.

Tabla 5.14. Acumulado de lluvia anual para todas las estaciones (mm)

	Lluvia (mm)			
	Hacienda Guachipelín	Bagaces	La Fortuna	Naranjo
2007	2912	2023	2171	3864
2008	2598	1996	2621	3343
2009	1225	995	1529	2348
2010	1967	426	2826	2260
2011	2892	424	2181	2106
2012	2109	340	2016	4727

5.5.1 Bagaces

La estación meteorológica se encuentra ubicada en la zona media de la cuenca 1, su zona de influencia según los polígonos de Thiessen abarca de la zona media hacia abajo. Los promedios de lluvia entre el 2007 y el 2012 cuentan con un total anual de 1034 mm de los promedios mensuales, lo cual es bajo para la zona en general, ya que cuenca arriba, los reportes de lluvia son superiores. Debido a la poca precipitación de la zona, la evapotranspiración reportada también es baja, y el aporte de agua al Río Piedras resulta escaso, como se observa en la Figura 5.11 la evapotranspiración

potencial de la zona cuenta con un valor de 1708 mm, lo que denota altas temperaturas y suelos que ceden agua fácilmente.

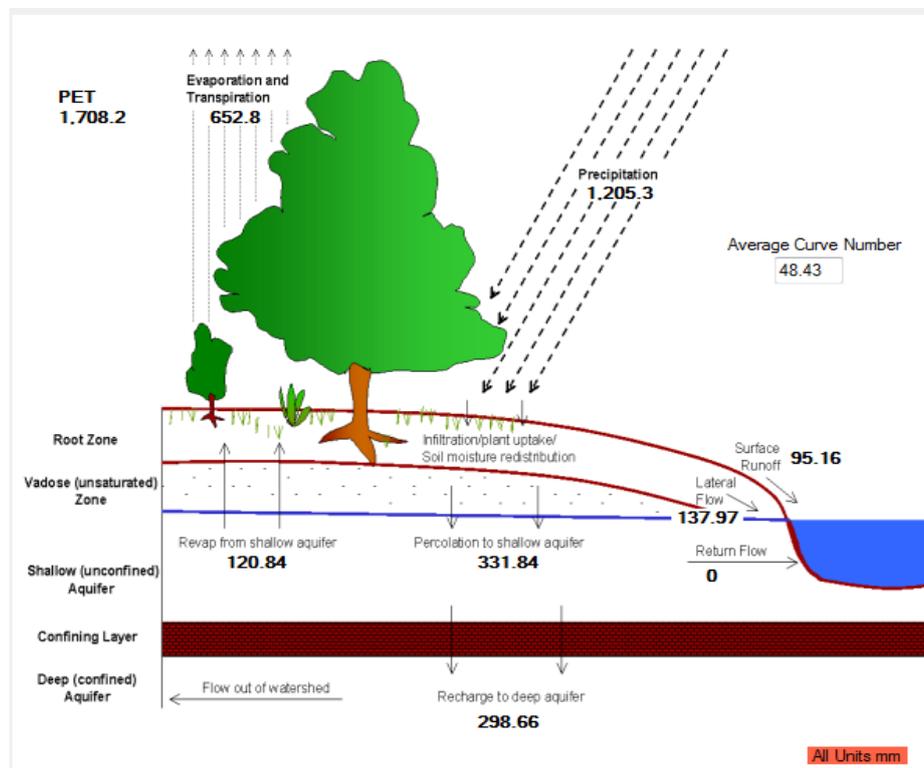


Figura 5.11. Modelación hidrológica según SWAT de la estación Bagaces.

En la Figura 5.12 se observa como en la simulación el caudal base aportado por las lluvias de la zona de Bagaces es bajo, debido a la poca cantidad de lluvia que reporta la estación. El modelo reporta para los años 2008 y 2009 importantes picos debido a las lluvias con altas intensidades que ascienden los 100 mm diarios. Sin embargo en los datos observados no se reportan altos caudales en el año 2009, es probable que la lluvia de alta intensidad que reporta Bagaces este localizada cerca de la estación meteorológica, lo que quiere decir que no son lluvias significativas para la cuenca, como el modelo lo estima.

Finalmente se observa que el patrón de lluvias de la estación cada año disminuye, lo que reporta grandes caídas en el aporte subterráneo de caudal, es por este motivo que posterior al año 2009 los caudales simulados descienden y además el caudal base también lo hace, entregando casi la totalidad del agua en eventos de lluvia para ser infiltrada en el acuífero profundo y una vez pasada la tormenta no existe recarga de agua a los ríos. Los altos caudales reportados por las estaciones del

ICE, se deben a la precipitación aportada por zonas altas de la cuenca, como se observará en el análisis de las otras estaciones meteorológicas.

El coeficiente de Nash calculado para los datos de caudal con el aporte de precipitación de la estación de Bagaces es de 0,01, a pesar de no ser el valor que se busca de 0,5, es un dato aceptable, tomando en cuenta que el patrón de lluvias después del 2009 no parece seguir el de caudales observados y que en el año 2009 se reportan altos caudales en la simulación. Se observa como la simulación obedece a los patrones de lluvia reportados en la estación de Bagaces.

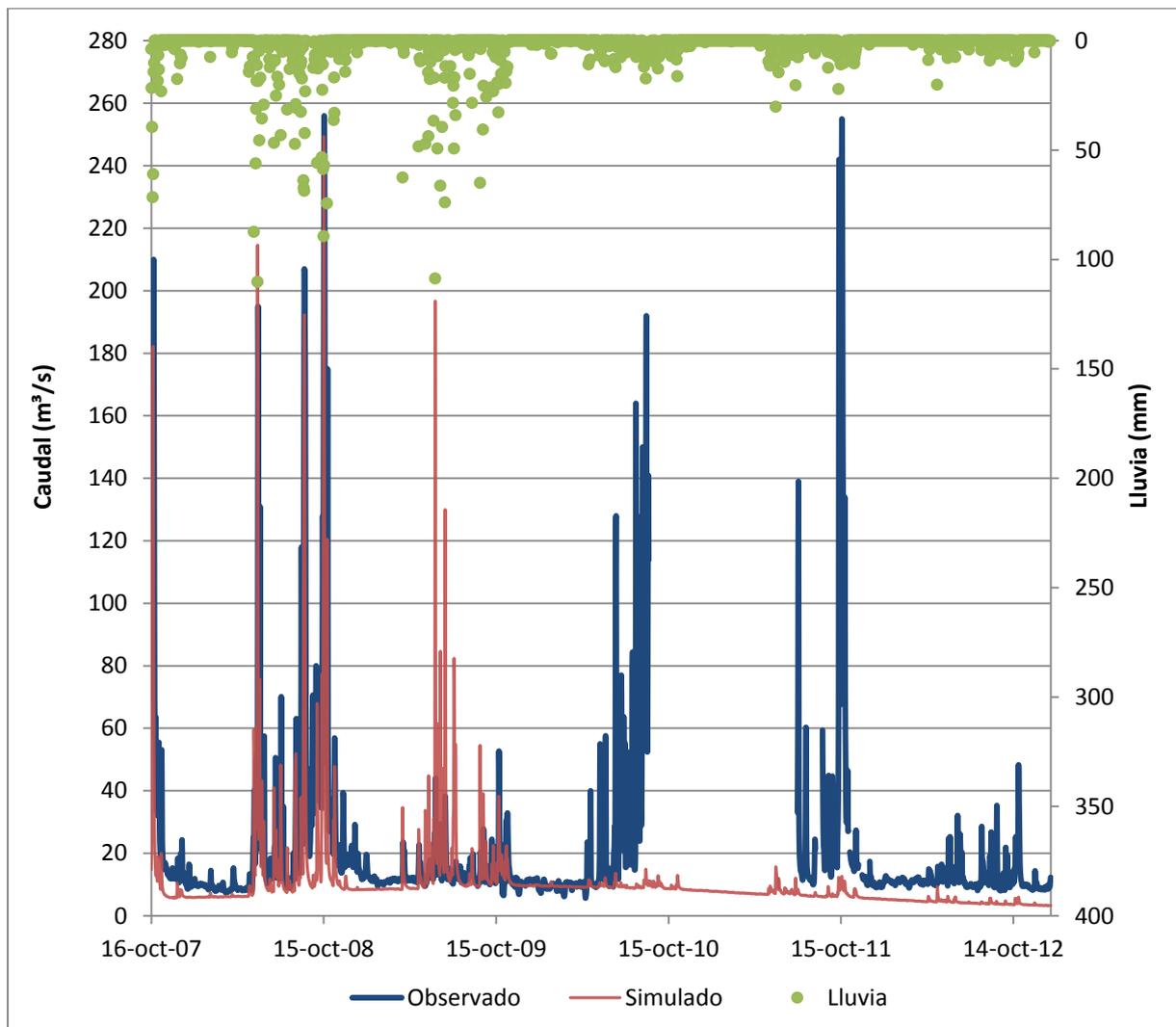


Figura 5.12. Hidrograma de Cuenca 1 con precipitación reportada en Bagaces.

5.5.2 Hacienda Guachipelín

La parte alta de la cuenca tiende a ser una zona lluviosa, esto es corroborado por el promedio anual reportado en la Tabla 5.14 y en la precipitación total anual de promedios mensuales calculado por SWAT de 2 434 mm de lluvia. Con altos valores de lluvia, Hacienda Guachipelín es la estación que menos influencia tiene según los polígonos de Thysen (Figura 5.10), ya que solo repercute en un extremo de la zona noroeste de la cuenca.

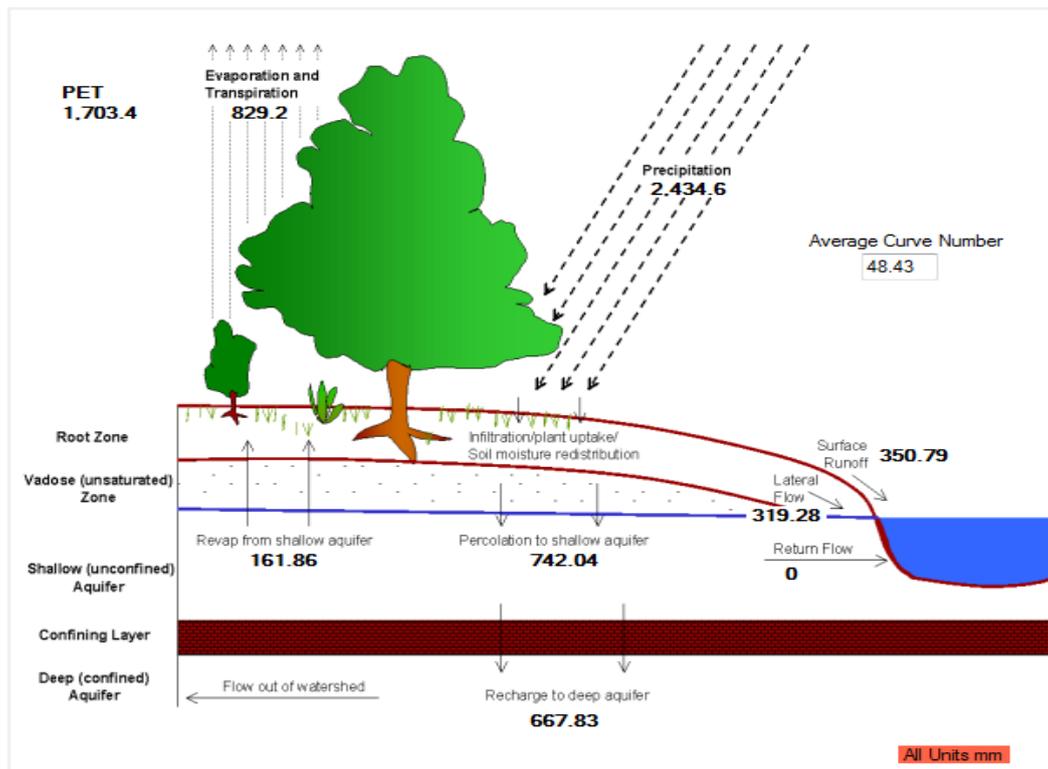


Figura 5.13. Modelación hidrológica según SWAT de la estación Hacienda Guachipelín.

El mayor porcentaje de precipitación (34%) es evapotranspirado y otra gran parte (30%) es infiltrada al acuífero profundo de la cuenca, según resultados del modelo. La evapotranspiración potencial reportada por el modelo es similar a la de la zona en estudio de 1 562 mm en promedio anual.

Según se observa en la Figura 5.14 la estación de Guachipelín reporta alta concentración de lluvias en la zona, en años como 2 008, 2 010 y 2 011 con fuertes intensidades en el mes de octubre, llegando a un máximo de más de 220 mm. En las tormentas reportadas el modelo obtiene grandes

picos de caudal, los cuales no se reflejan en los datos observados del Río Piedras, porque esta lluvia reportada no tiene gran influencia en la cuenca en estudio. Se utiliza la estación como única en esta modelación con el fin de observar y analizar el comportamiento de los caudales reportados por el ICE debido a la influencia de la lluvia de zonas tan alejadas.

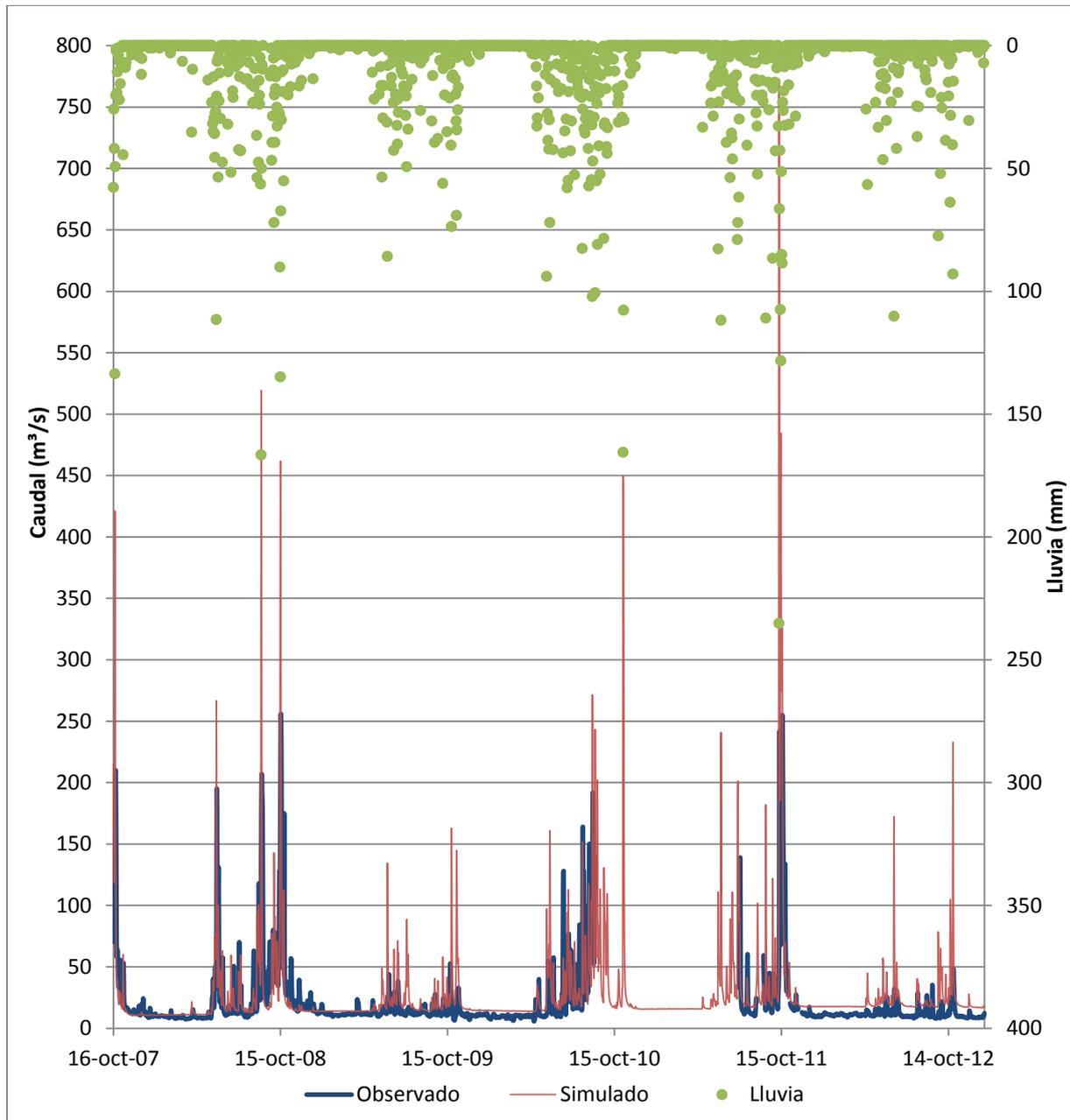


Figura 5.14. Hidrograma de Cuenca 1 con precipitación reportada en Hacienda Guachipelín.

Se debe rescatar que el patrón de datos de caudal simulado coincide con el patrón de datos observados, a pesar de no ser caudales provocados por estas lluvias, la lluvia de la zona alta es la que influye principalmente en estos patrones. El cálculo de error de Nash para caudales provocados con la estación de Guachipelín es de -0.58, un valor poco aceptable, producido por los picos de caudal de los años 2008 y 2011, los cuales probablemente en la realidad afectaron zonas cercanas a esta cuenca.

5.5.3 La Fortuna

En la zona alta de la cuenca se encuentra la estación meteorológica de la Fortuna, de las estaciones utilizadas en la cuenca 1 es la que cuenta con mayor precipitación anual promedio según la Tabla 5.14, sin embargo en la relación con las otras estaciones su percolación es menor, esto puede deberse a que sus lluvias se encuentran más distribuidas a lo largo del tiempo, saturando el acuífero y provocando mayor escorrentía.

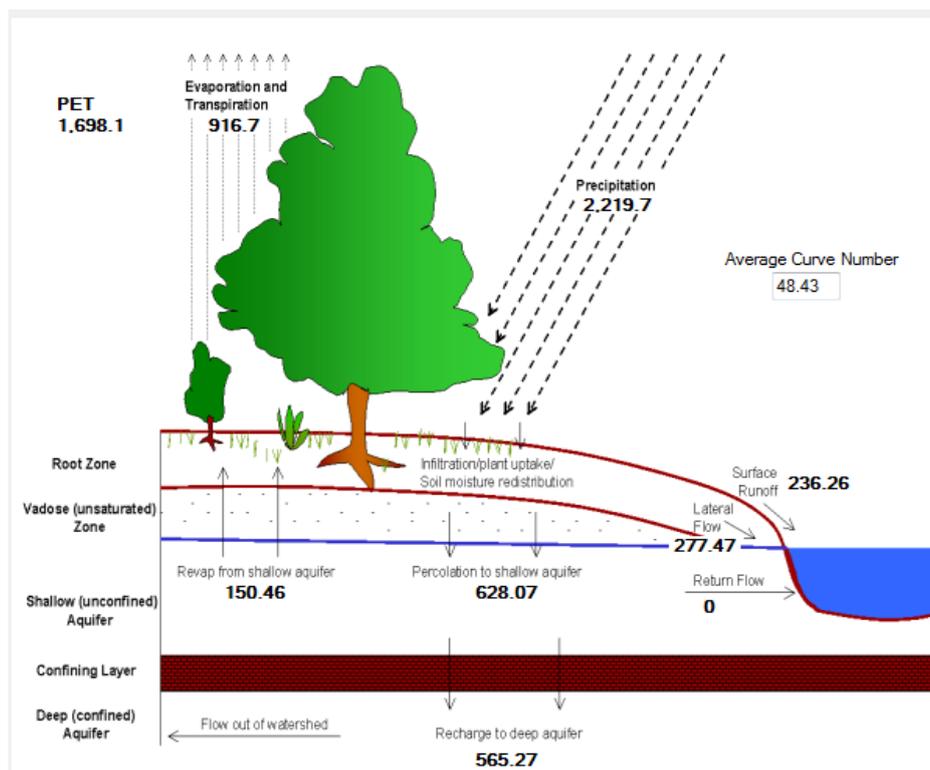


Figura 5.15. Modelación hidrológica según SWAT de la estación La Fortuna.

La zona de influencia de la estación Fortuna es la parte alta de la cuenca en estudio, y por los datos observados en la Figura 5.16, la zona que hace el aporte más certero de caudales al Río Piedras y San

Jerónimo. Los patrones de caudales de la simulación y los observados son similares según se comprueba con el gráfico. El caudal promedio de los datos observados es de 20,3 m³/s, mientras que el de los datos simulados es de 23,11 m³/s, con desviaciones estándar de 27,2 y 29,0 m³/s respectivamente. Finalmente el coeficiente de Nash para el caudal producido por la estación Fortuna es de 0,31, dato que indica la alta influencia que tiene la lluvia de la zona para los caudales de la cuenca en estudio.

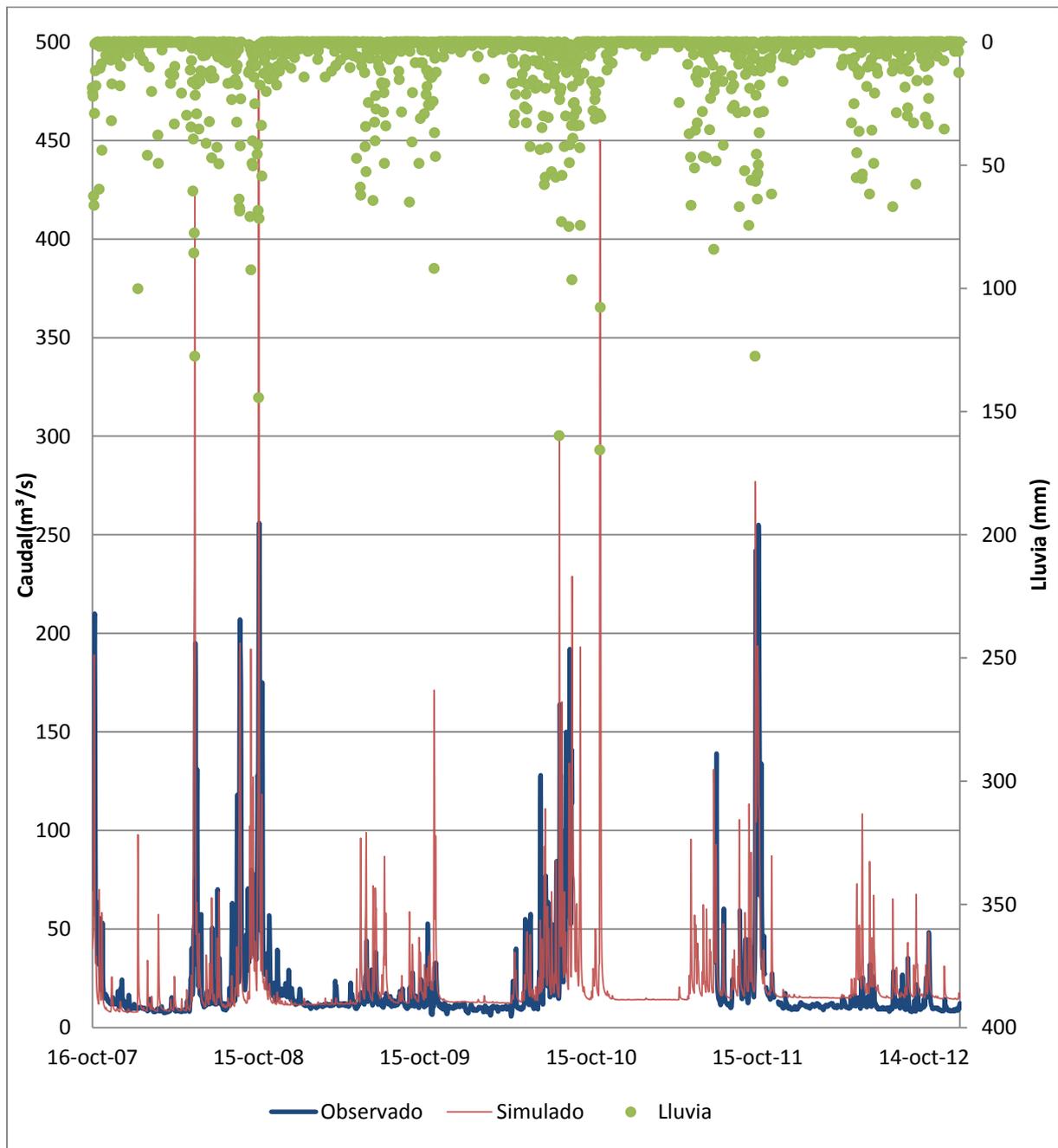


Figura 5.16. Hidrograma de Cuenca 1 con precipitación reportada en La Fortuna.

El caudal base es simulado de manera precisa, sin embargo los caudales picos son los que se mantienen elevados, se podría calibrar los datos de parámetros de manera que se disminuyan, sin embargo el modelo se desajusta en otras variables. Las posibilidades implican aumento de infiltración ya sea disminuyendo el número de curva, aumentando la conductividad hidráulica, incluso aumentando la fracción de agua que pasa al acuífero profundo, pero esto conlleva algunas consecuencias como la disminución de evapotranspiración, además de pérdida de agua que llega al caudal base.

En la Tabla 5.15 se confirma lo observado en la Figura 5.16, el caudal en los meses secos aumenta en todos los años con excepción de los meses pertenecientes al año 2008-2009, y para el último año el aumento es elevado, por el patrón de lluvias de la zona alta donde se encuentra la estación La Fortuna el caudal simulado es mayor, es conocido que este año fue especialmente seco, por eso existe una disminución del caudal observado, este es el motivo de la gran diferencia de caudales.

Tabla 5.15. Caudales promedio de meses secos (diciembre-abril) con datos de precipitación de la estación La Fortuna.

Año	Caudales observados (m ³ /s)	Caudales simulados (m ³ /s)	% de diferencia
2007-2008	10,1	11,4	13
2008-2009	13,2	12,1	-8
2009-2010	10,0	13,3	33
2010-2011	---	14,2	---
2011-2012	11,0	15,4	40
2012-2013	9,2	14,9	62

Al contrario que los meses secos, en la Tabla 5.16, se muestran que la variación de los caudales en la época lluviosa es mayor, esto debido a que influyen los caudales picos producto de las tormentas, como los caudales base. Además se debe recordar que la simulación se realiza únicamente con la lluvia de una zona, lo que no permite una adaptación exacta de la zona.

Tabla 5.16. Caudales promedio de meses lluviosos con datos de precipitación de la estación La Fortuna.

Año	Caudales observado (m³/s)	Caudales de simulados (m³/s)	% de diferencia
2007	41,1	28,8	-30
2008	36,5	35,9	-2
2009	14,4	23,8	65
2010	38,4	39,8	4
2011	38,3	33,5	-13
2012	12,6	22,2	76

5.5.4 Estación Virtual

Con el fin de tomar en cuenta todos los patrones de lluvia de la zona, se crea una estación virtual, con los datos de lluvia de cada estación (Hacienda Guachipelín, La Fortuna, Bagaces) de manera que cuente con su valor ponderado de acuerdo al área de influencia por los polígonos de Thiessen.

De esta manera se obtiene la Figura 5.17, donde se reportan caudales con un coeficiente de Nash de 0,35, el valor más acertado de las modelaciones. Podemos observar como las lluvias se mantienen en un valor intermedio, lo que estabiliza el caudal base, sobre todo en el año 2012, donde en Bagaces era inferior que el observado y por el contrario en La Fortuna es superior. Es por este motivo y la disminución de los valores pico que el error calculado presenta mejoras, de acuerdo a los requisitos del estudio.

A pesar de tener un buen coeficiente de Nash, no es una simulación que satisfaga de acuerdo a la problemática presentada en la zona, ya que es necesario identificar caudales picos incluso con el beneficio de mantener un margen de seguridad al exagerar el valor del caudal. Por lo tanto a pesar de simular de forma precisa el caudal base lo que ayuda a predecir la cantidad de lluvia con que se cuenta en época seca, en los meses lluviosos no presenta beneficio la predicción de caudales.

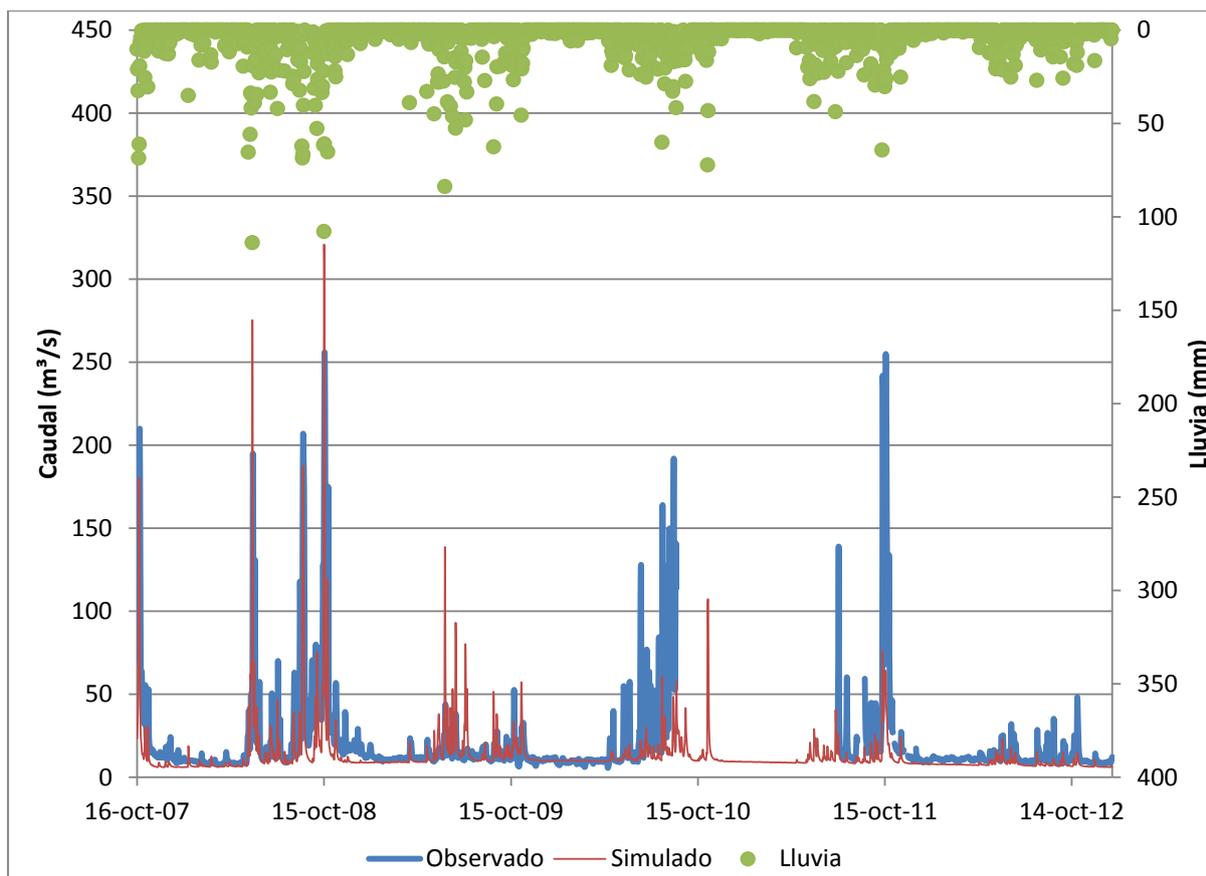


Figura 5.17. Hidrograma de Cuenca 1 con precipitación de una estación virtual.

5.6 MODELACIÓN HIDROLÓGICA CUENCA 2.

5.6.1 Río Naranjo

La estación de Río Naranjo tiene influencia sobre la parte alta de la cuenca 2, siguiendo el patrón que se utilizó con la Fortuna, se toma esta estación para realizar la modelación de la cuenca 2 debido a la gran influencia que tiene por su ubicación.

En la Figura 5.18 se observan los resultados promedio de la simulación entre los años 2005 y 2011, entre los puntos más importantes se encuentra que esta zona presenta la precipitación más alta entre las estaciones, por esta razón y tomando en cuenta que es una zona lluviosa a lo largo del año es motivo para que la evapotranspiración aumente.

En comparación con la cobertura de suelos de la cuenca 1, el número de curva aumentó levemente, a pesar de esto la escurrentía disminuyó, lo que se puede deber a lluvias pequeñas pero constantes, que permiten una adecuada infiltración de los suelos, de hecho se observa como la infiltración al acuífero profundo y superficial aumenta, y la mayor parte del agua que llega al río se debe al flujo lateral de esta infiltración superficial.

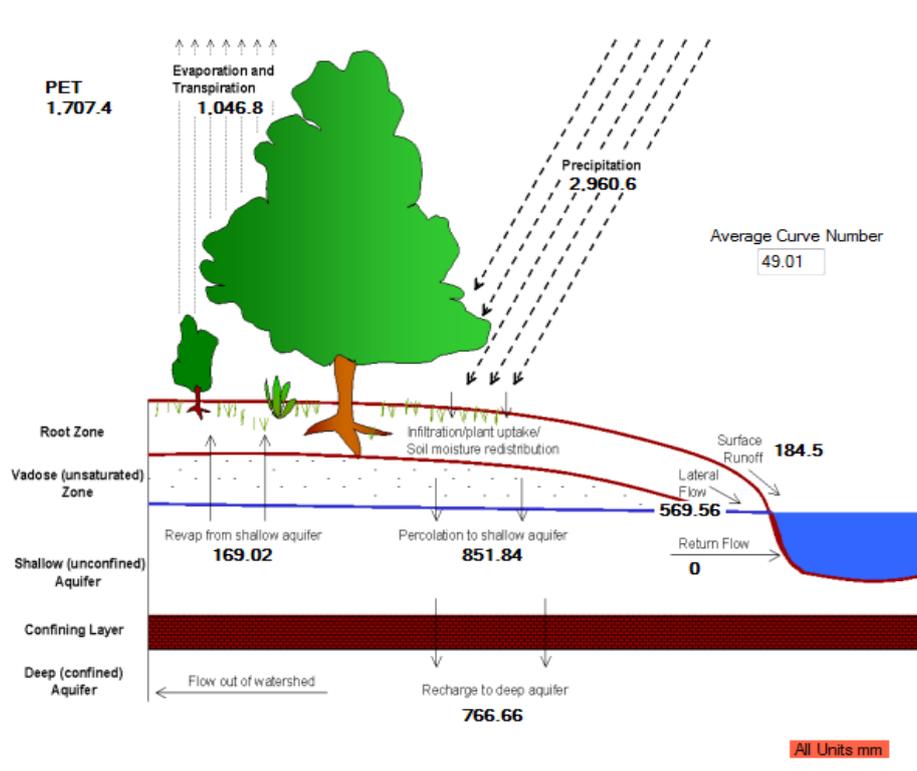


Figura 5.18. Modelación hidrológica según SWAT de la estación Río Naranjo.

En la Figura 5.19. se confirma como la simulación con los ajustes de una pre-calibración mantiene el caudal base estable y con el mismo patrón de los datos observados, los caudales picos se mantienen superiores a los reales, sin embargo se observa un desajuste en los datos cuando los caudales disminuyen, sobre todo a finales del año 2007 y cerca del mes de octubre del 2010, los datos de lluvia en esos lapsos concuerdan con el bajo caudal reportado, por lo que el caudal observado debe de estar reportando lluvias de otras zonas de la cuenca.

El error de Nash para los caudales calculados en la modelación es de 0,34, un valor bastante aceptable tomando en cuenta que la calibración fue dada en una zona alejada y no en esta cuenca.

El error es un buen indicador para esta zona, y se observa que esto se da porque los caudales picos se no se elevan mucho más allá de los observados.

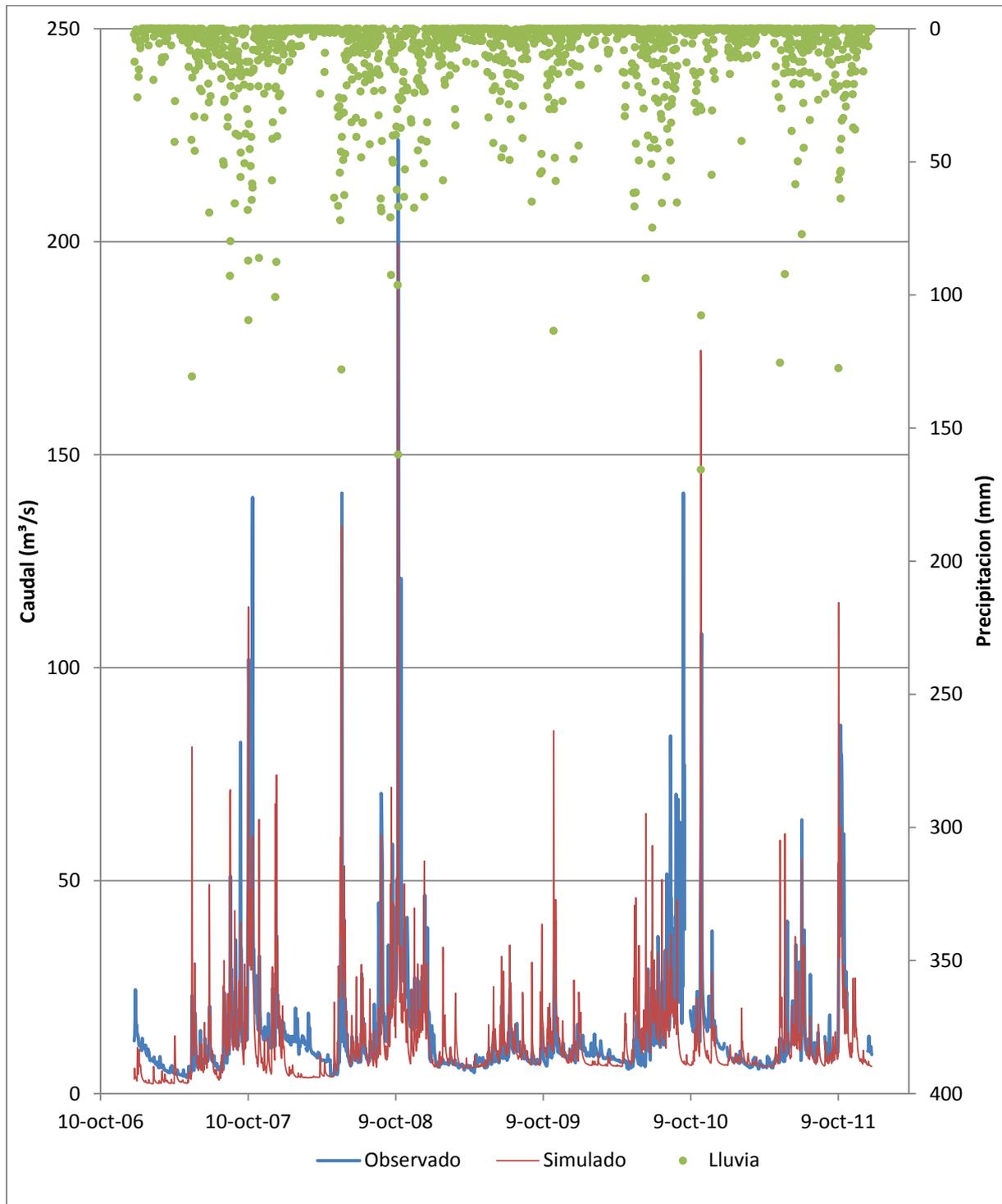


Figura 5.19. Hidrograma de Cuenca 1 con precipitación reportada en Río Naranjo.

Se debe tomar en cuenta que la zona de influencia de la estación Naranjo comprende la parte alta de la cuenca y que no la abarca toda, por lo que a pesar de representar la hidrología de la zona con un pequeño error no se adapta totalmente, ya que se debería realizar un análisis de la precipitación y temperatura de otras zonas.

En la Tabla 5.17 se observan los caudales simulados y observados en los meses secos, prácticamente la simulación mantiene caudales menores que los observados, el último periodo de meses presenta un aumento, pero se debe al faltante de datos observados en algunos días. Como se mencionó anteriormente es beneficioso que en los meses de verano se simule un poco menos de agua, para contar con un margen de error adecuado para la sequía, sin embargo no debe excederse de manera que no se refleje la realidad de caudales.

Tabla 5.17. Caudales promedio de meses secos (diciembre-abril) con datos de precipitación de la estación Río Naranjo.

Año	Caudales observado (m ³ /s)	Caudales simulados (m ³ /s)	% de diferencia
2007-2008	12,3	7,8	-57.9
2008-2009	10,4	10,7	3.4
2009-2010	9,3	8,2	-13.1
2010-2011	8,7	8,0	-9.0
2011-2012	10,5	12,9	18.8

Como en los meses secos, en los lluviosos de la Tabla 5.18, se muestra una disminución de los caudales promedio, lo que indica que tanto los caudales base como los picos disminuyen en general, esto se observa de forma clara en la Figura 5.19. A pesar de tener un coeficiente de Nash alto no representa los caudales pico de forma certera.

Tabla 5.18. Caudales promedio de meses lluviosos con datos de precipitación de la estación Río Naranjo.

Año	Caudales observado (m ³ /s)	Caudales simulados (m ³ /s)	% de diferencia
2007	25,1	16,7	-49.9
2008	20,7	19,4	-6.9
2009	9,9	12,5	21.4
2010	20,6	16,8	-22.5
2011	17,5	14,7	-19.0

5.7 ESCENARIOS

Los escenarios presentados a continuación se plantean para la cuenca 1 con la lluvia reportada por la estación Fortuna, ya que como se comprobó anteriormente tiene lluvias que resultan representativas para la cuenca en estudio. Cada uno de los escenarios se evalúa para posibles cambios en el año 2025 al 2030, con las condiciones de la cuenca para los años del 2007 al 2012, exceptuando la condición que se piensa evaluar.

5.7.1 Escenario 1: Cambio de cobertura del suelo

Para este escenario se toma en cuenta el cambio de cobertura reportado en la Tabla 4.3. El cambio de cobertura provoca incrementos en los caudales promedio como es de esperar, ya que las áreas con menor número de curva disminuyen y el número de curva promedio de la cuenca varía de un 48,43 a un 67,33, provocando mayor escurrimiento hacia el cauce del río, como se demuestra en la Figura 5.20, donde se observa un aumento de casi el doble del escurrimiento superficial y un aumento del flujo lateral.

El año 6 se informa de un comportamiento distinto de los otros años, retomando la Tabla 5.14 (año 2012) este año fue especialmente seco. El modelo toma agua del acuífero superficial para abastecer parte del caudal del río, no obstante la precipitación reportada para este año no es suficiente para llenar el acuífero e incluso ceder parte al río, un fenómeno parecido ocurre en el año 3, sin embargo para este año la lluvia no es tan baja, logrando mantener el acuífero y cediendo la misma cantidad que en suelos con mayor infiltración.

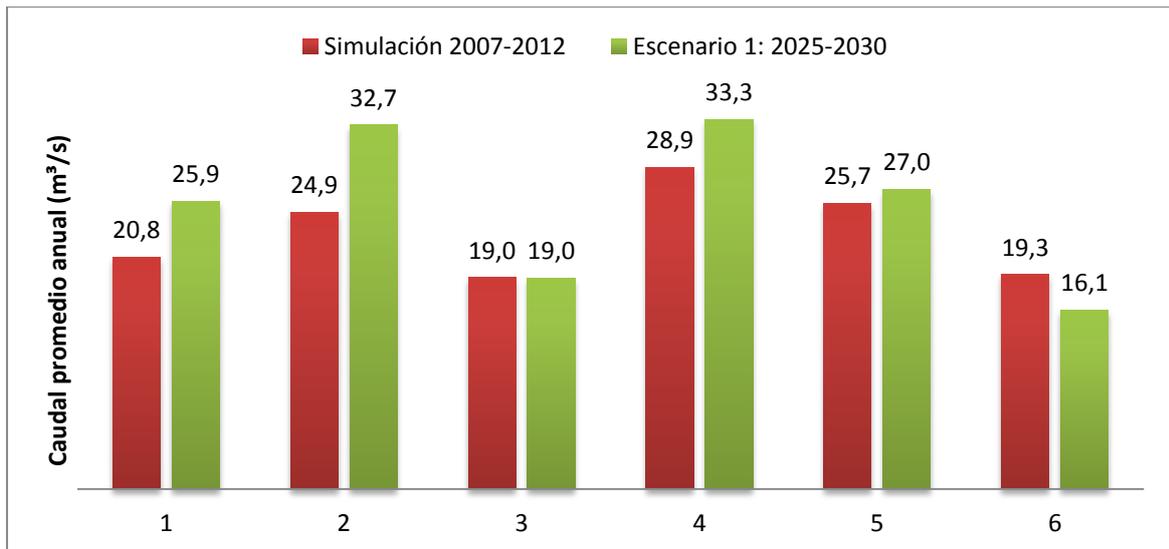


Figura 5.20. Modelación de Cuenca 1 aplicando cambio de cobertura a lo largo de 6 años.

Realizando un análisis de los datos diarios para el año 6 el caudal disminuye en 324 días, durante estos días se calcula una disminución de $9,70 \text{ m}^3/\text{s}$ en promedio, mientras que para el año 2 se calcula que los días que disminuye el caudal es de 261, sumando la disminución de estos días se reporta un promedio de $4,12 \text{ m}^3/\text{s}$.

En las Figura 5.21 se observa que el caudal base para el año 2 (años 2008 y 2026) no disminuye significativamente, esto debido a la gran cantidad de agua que cae este año desde enero, lo que satura el suelo y provoca mayor escurrimiento al río estudiado, además se observa una distribución uniforme a lo largo del tiempo permitiendo mantener estable el caudal base, contrario a lo que sucede en el año 6 (Figura 5.22) donde la lluvia comienza a mediados de abril y en menor intensidad, se observa que la mayor intensidad es de 67 mm, un valor bajo comparado con los años anteriores. Este comportamiento en las lluvias del año 6 reduce el grado de saturación del suelo, y el agua se infiltra al acuífero profundo o se evapora sin llegar al río, por este motivo el caudal base disminuye, lo que produce que en promedio el caudal anual disminuya.

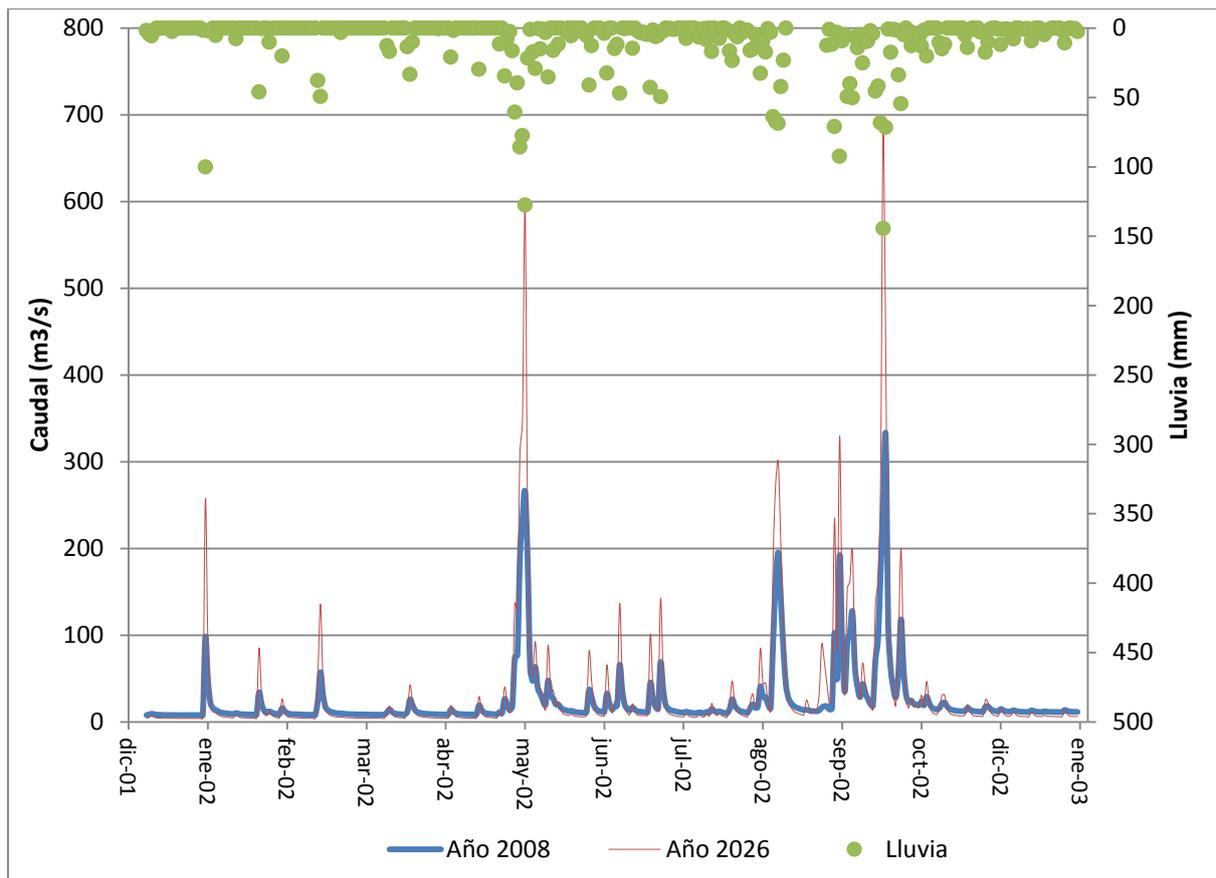


Figura 5.21. Hidrograma de año 2 para el escenario de cambio de cobertura.

Parte del fenómeno ocurrido se observa en el gráfico Figura 5.20 donde cambiadas las condiciones de cobertura de suelo, el caudal base disminuye en general para todo el periodo de tiempo, sin embargo en eventos extremos los caudales pico aumentan significativamente. Esto muestra que al aumentar la impermeabilidad del suelo cuando hay eventos de alta intensidad de lluvia aumenta el caudal del río, y en época seca sucede lo contrario, debido a esto el año 2 donde se presenta la mayor cantidad de tormentas es donde se encuentra el mayor incremento de $7,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Y en los años 3 (2009 y 2027) y 6 (2012 y 2030) donde la época lluviosa entra tardía en el mes de mayo y las tormentas son de menor intensidad, el agua de lluvia es infiltrada en mayor cantidad al acuífero profundo quedando menor cantidad en el acuífero superficial como flujo lateral que llega al río.

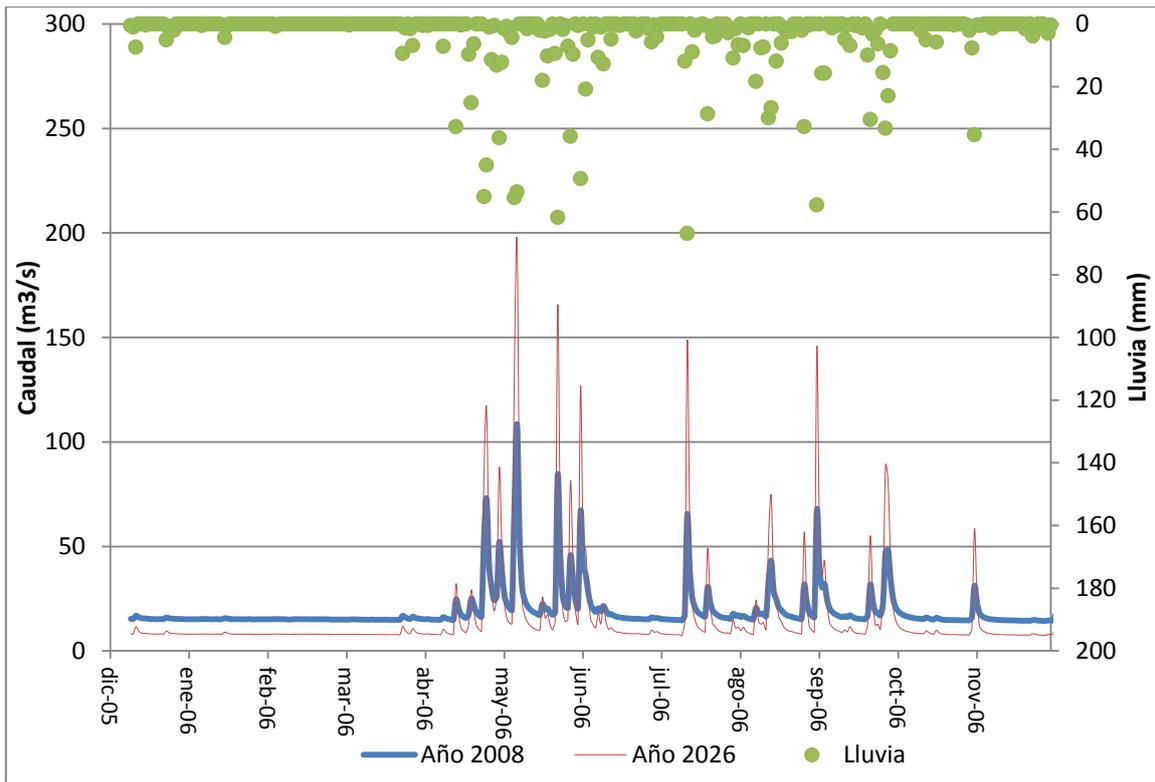


Figura 5.22. Hidrograma de año 6 para el escenario de cambio de cobertura.

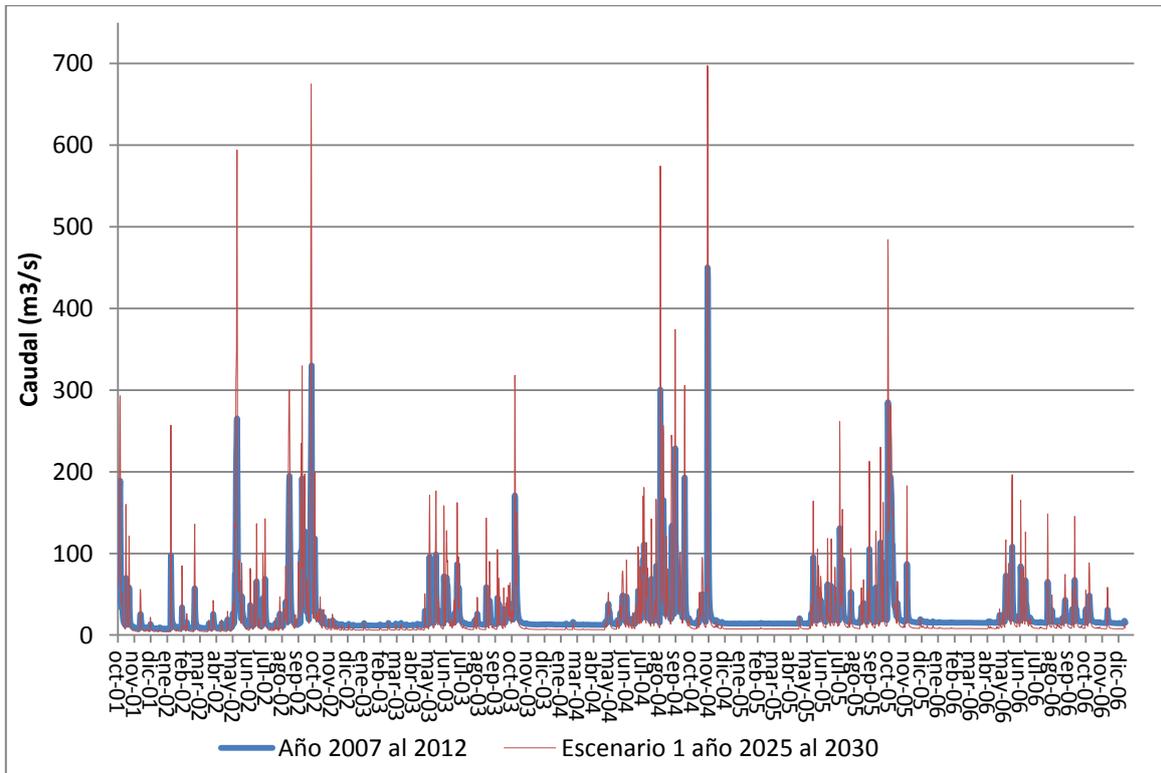


Figura 5.23. Hidrograma para la comparación con un cambio de cobertura.

La Tabla 5.19, muestra como disminuye el caudal promedio en los meses secos, es decir de diciembre a abril. En todos los años disminuye el valor de caudal, mostrando la problemática que se podría dar en estos meses, ya que en la actualidad se presenta problemática de sequía y una gran demanda de concesiones al río.

Tabla 5.19. Promedio de caudales (m³/s) en meses de diciembre a abril.

Año		diciembre	enero	febrero	marzo	abril	Total	% de diferencia
1	Actual	9,1	---	---	---	---	9,1	-32
	Escenario 1	6,2	---	---	---	---	6,2	
2	Actual	12,2	13,5	11,2	12,2	10,7	59,9	-7
	Escenario 1	7,7	16,3	10,6	12,6	8,6	55,7	
3	Actual	13,1	11,8	11,8	12,2	12,3	61,2	-44
	Escenario 1	7,0	6,8	6,5	7,0	7,2	34,5	
4	Actual	14,2	13,0	13,1	12,7	14,5	67,6	-42
	Escenario 1	7,7	6,9	7,5	6,8	10,5	39,4	
5	Actual	16,0	14,1	14,2	14,2	14,6	73,1	-45
	Escenario 1	9,5	7,5	7,6	7,5	8,4	40,5	
6	Actual	15,0	15,4	15,2	15,1	15,2	75,9	-46
	Escenario 1	8,3	8,4	8,1	8,0	8,3	41,0	

Se confirma que al disminuir zonas forestales y sustituirlas por zonas urbanas, incluso agrícolas se provocan grandes movimientos de agua a nivel superficial, modificando los caudales en ríos. Según el planteamiento del problema mencionado en el capítulo 1, en la zona existe dos grandes problemáticas, la sequía en cinco meses e inundaciones en época lluviosa que comienza aproximadamente en mayo. En un escenario como el planteado el problema de inundaciones en época lluviosa se incrementa y muy al contrario, en época seca se presenta déficit de agua en mayor cantidad que actualmente se da.

Este escenario puede ser controlado por medio de cosechas de agua de lluvia, controlando así el agua en excedente en los meses lluviosos y utilizándola en época seca para riego.

5.7.2 Escenario 2: Calentamiento Global

El escenario 2 implica un cambio en la temperatura y la precipitación, aumentando 0,45 °C y disminuyendo la lluvia reportada en la estación La Fortuna un 10%. Se representa en la Figura 5.24 la disminución de caudales la cual es marcada cuando se aplica un incremento en la temperatura

atmosférica y disminución de cantidad de precipitación, incluso los datos indican que el problema se agrava más que si existiese un cambio de cobertura vegetal. En el año 3 (2009 y 2027) se observa la mayor disminución de caudal promedio con un valor porcentual de 16,64 %, esto no quiere decir que en años con poca precipitación exista mayor disminución, ya que el año 1 es el segundo con mayor cambio.

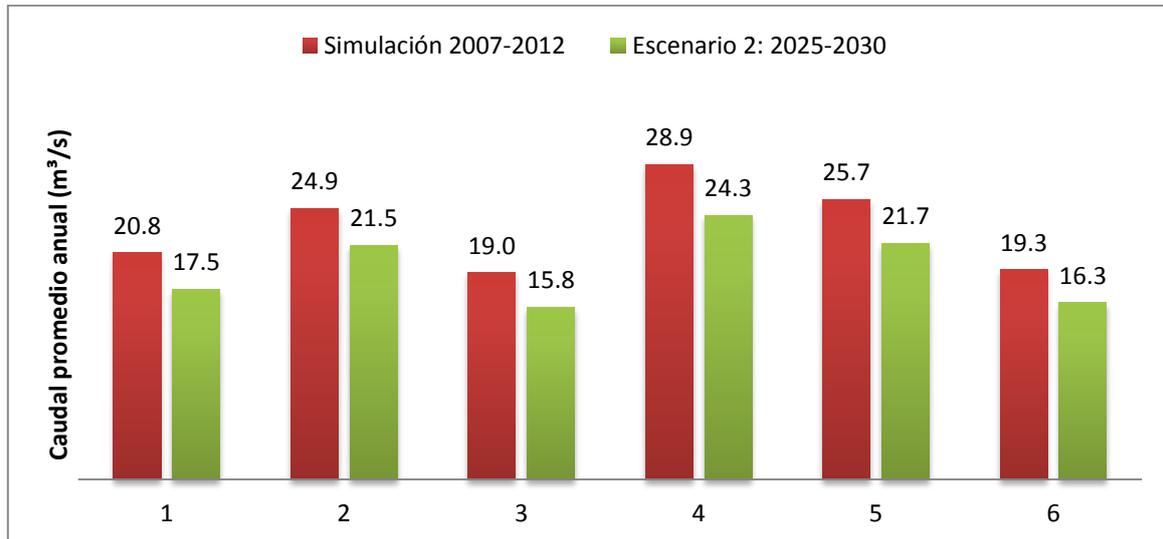


Figura 5.24. Modelación de Cuenca 1 aplicando un aumento de temperatura de 0,45 °C.

Para este escenario la disminución de caudales se da constante tanto para las lluvias con altas intensidades como para los periodos secos, esta afirmación se observa en la Figura 5.25, donde en general se observa el mismo patrón a lo largo de las dos simulaciones.

En este caso puede ser beneficioso una disminución de intensidad en la época lluviosa para disminuir los caudales picos y por lo tanto el desbordamiento del río, a la vez que existe una disminución en la recarga de acuíferos disminuyendo los caudales base del río, lo que provoca que en los meses secos la problemática de escasez de agua aumenta.

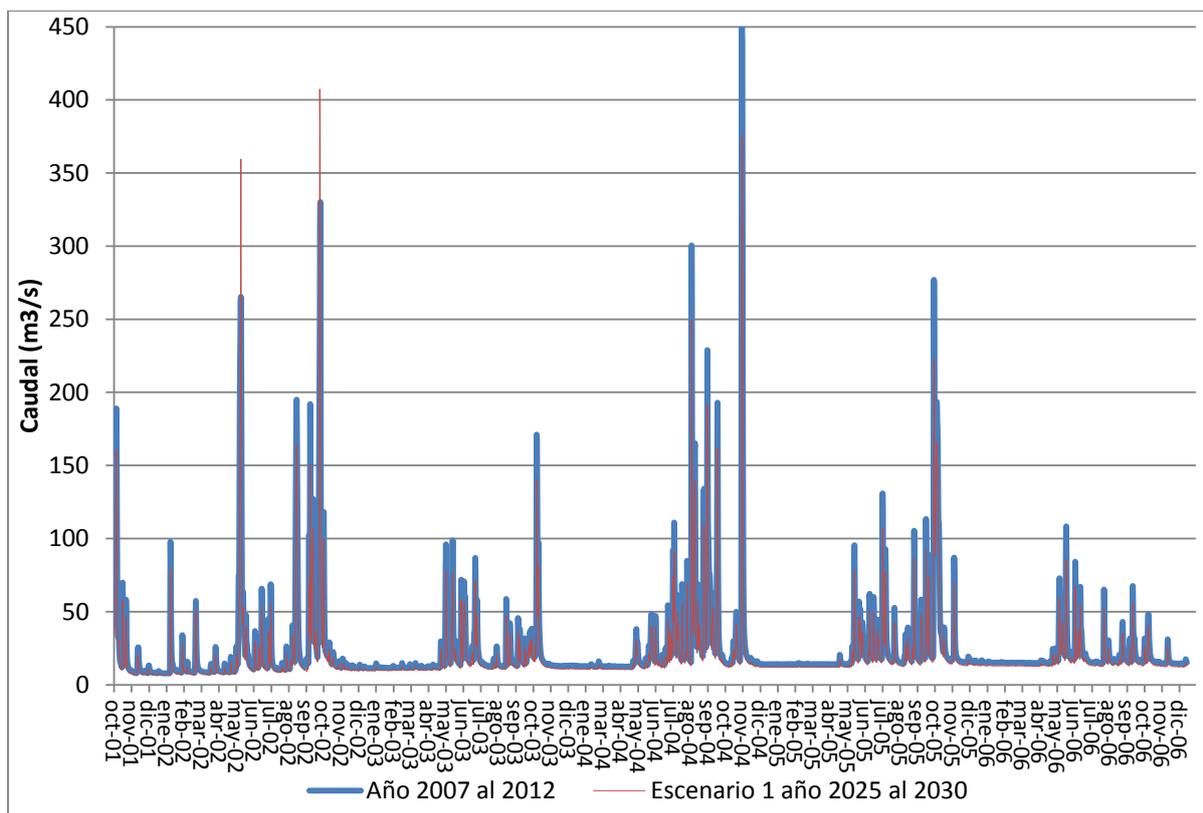


Figura 5.25. Hidrograma para la comparación de cambio climático.

La disminución de los caudales varía de año en año dependiendo mucho de la temperatura del año y la distribución de su lluvia, es así como para el año 4 (2010 y 2028) la disminución es mayor que para los demás años debido a la constante lluvia que se da a lo largo de los meses de invierno, esta se encuentra distribuida a lo largo de varios días. Por el contrario el año 6 (2012 y 2030) muestra la lluvia distribuida en pocos días lo que provoca que sea el año con menor evapotranspiración por lo tanto menor disminución de caudal.

La cantidad de agua en el cauce del río presenta grandes disminuciones cuando la temperatura ambiente aumenta, debido al incremento en la evapotranspiración, la cual aumenta de 1698,1 mm a 1736,5 mm. En la Tabla 5.21 se observan los promedios de la evapotranspiración potencial de los 8 años simulados, y se muestra como para el escenario del calentamiento global este valor aumenta en cada mes a pesar de que la cantidad de lluvia disminuye en un 10%.

Tabla 5.20. Promedio de caudales (m³/s) en meses de diciembre a abril.

Año		diciembre	enero	febrero	marzo	abril	Total	% de diferencia
1	Actual	9.1					9.1	-18
	Escenario 1	7.5					7.5	
2	Actual	12.1	13.5	11.1	12.2	10.9	59.8	-17
	Escenario 1	10.1	11.1	9.3	10.3	9.0	49.8	
3	Actual	13.0	11.8	11.8	12.2	12.3	61.2	-16
	Escenario 1	10.9	9.9	9.9	10.2	10.3	51.3	
4	Actual	14.2	13.0	13.1	12.7	14.5	67.6	-16
	Escenario 1	12.1	10.8	11.0	10.6	12.1	56.7	
5	Actual	16.0	14.1	14.2	14.2	14.6	73.1	-15
	Escenario 1	13.6	12.0	12.0	12.0	12.4	62.0	
6	Actual	14.9	15.4	15.2	15.1	15.2	75.9	-15
	Escenario 1	12.7	13.1	12.9	12.9	13.0	64.5	

Tabla 5.21. Promedio mensual de todos los años de evapotranspiración potencial.

Evapotranspiración potencial (mm)		
Mes	Actual	Escenario 2
1	119,22	123,15
2	128,24	129,97
3	165,61	166,85
4	173,38	174,31
5	165,15	165,55
6	146,85	147,43
7	153,65	154,46
8	158,54	159,88
9	145,91	147,52
10	122,61	125,30
11	117,33	119,23
12	117,74	121,76

5.8 SITUACIÓN EN LA ZONA

Actualmente los caudales producidos por las cuencas Piedras y Río Tenorio no son utilizados directamente para el proyecto DRAT, sin embargo en el pasado han existido importantes concesiones de sus ríos, aunque en la actualidad se dan pequeñas concesiones.

A futuro se piensa construir un embalse sobre el Río Piedras, aguas arriba del área donde se desarrolla el actual estudio, para abastecer a la zona media de la cuenca de Tempisque y zonas costeras de agua, tanto para agricultura como para consumo humano, por lo que realizar estudios hidrológicos de la zona representa de vital importancia para los proyectos a futuro, evaluando la condición de los ríos frente a cambios de uso de suelo y de cambio climático.

Se debe tomar especial interés en establecer un método de estudio hidrológico de la zona, para así realizar un cálculo de caudal base de los ríos, pretendiendo mantener un caudal ecológico para mantener viva la flora y fauna de la zona que presenta beneficio. Considerando los resultados obtenidos en las simulaciones se puede recomendar el modelo SWAT para realizar estudios hidrológicos en la zona, a pesar de contar con la información de una de las estaciones meteorológicas.

Tomando en cuenta la sequía de algunos años sobre todo si influye el fenómeno ENOS, el caudal base puede llegar a ser menor que lo usual en años con lluvias con patrones típicos, provocando problemas en caso de existir un proyecto mayor. Es en este caso donde se deben evaluar posibles soluciones para llevar mejor los años secos, se pueden incluir cosechas de agua, ya que como se mencionó anteriormente en los meses de lluvia, el caudal crece desmedidamente lo que se presta para ser almacenada para usos posterior.

Es un hecho que en la zona existirán cambios de cobertura e incluso cambios climáticos como los presentados en los escenarios, por lo que es necesario realizar planes para los cambios que en 10 años se proyectan. En la zona se trabaja actualmente por la construcción del embalse Piedras, el cual pretende dar la oportunidad de disminuir la escasez en los meses secos, lo que presenta una posible solución a la problemática que se ha proyectado en el presente estudio, además de que recibirá los excedentes del canal oeste, así que podría colaborar a mantener el flujo base aguas abajo, mitigando los efectos del cambio climático.

Capítulo 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

El modelo cuenta con la particularidad de no poder ingresar más de una estación meteorológica al mismo tiempo, de esta manera no se puede recrear las condiciones en su totalidad, esto no permite una simulación total de la zona de estudio. Por lo tanto el modelo es recomendado para cuencas que cuentan con topografía uniforme, donde el comportamiento de la lluvia y los patrones de temperatura son uniforme en toda el área.

La zona cuenta con cobertura de suelo principalmente forestal y grupos hidrológicos de tipo A, situación que colabora con mantener números de curva bajos y alta infiltración en sus suelos.

Los años utilizados para la modelación incluyen del 2007 al 2012, de estos años se cuenta con dos que su época lluviosa comienza tardía además de ser especialmente secos, el 2009 y el 2012. Al realizar los análisis, estos años reportan grandes disminuciones de caudal con respecto a los otros en los resultados, esto se debe a dos motivos principales, la cuenca recarga parte del caudal del río por el exceso de agua en el manto acuífero, en lo que llama flujo lateral, durante estos dos años este fenómeno no ocurre, ya que las lluvias solo alcanzan para infiltrarse al manto acuífero y no hay exceso. El segundo motivo sería la distribución de sus lluvias de mayor intensidad en muy pocos días.

Las estaciones de Hacienda Guachipelín, Fortuna y Río Naranjo, situadas en la zona alta reportan mayores precipitaciones que en la estación de Bagaces ubicada en la zona media de la cuenca. A pesar de que Bagaces es la que cuenta con mayor influencia sobre la zona, según los polígonos de Thiessen, no tiene las lluvias más representativas, debido a que la simulación mantiene un error del coeficiente de Nash de 0,01 al comparar los caudales observados contra los simulados.

La estación la Fortuna es la que mantiene las lluvias más representativas y que modelan mejor los caudales de la cuenca 1, esto debido a la ubicación de la estación en la zona alta de la cuenca unos 433 msnm, donde se da mayor precipitación. El cálculo del coeficiente de Nash para los caudales producidos por esta estación, es de 0,31, demostrando que la lluvia medida en la Fortuna es la que aporta la mejor distribución de agua al Río Piedras, y la que se ajusta mejor a la cuenca 1.

Una estación virtual con los datos de precipitación de todas las estaciones de forma ponderada, calcula caudales con un coeficiente de Nash de 0,35 con respecto a los caudales observados, a pesar

de esto el patrón de caudales no representa la zona, principalmente en los datos picos, los cuales son de especial interés de cuantificar.

El modelo permite ser calibrado y utilizado en cuencas aledañas con las mismas características topográficas, como en la simulación de la cuenca 2, donde los caudales calculados por el modelo mantienen un error de Nash en el rango aceptable de 0,34, donde se utilizó la calibración de la cuenca 1 que mantiene una topografía similar. Este resultado muestra que incluso el error disminuye en esta zona.

Para el año 2025 se prevén grandes cambios en la zona, tales como cambios en los usos de suelo y cambios climáticos. De producirse un cambio de cobertura, disminuyendo bosques y aumentando pastos y cultivos, la problemática presente en la zona se agravaría, ya que en la época lluviosa los caudales aumentan provocando mayores inundaciones y en los meses secos el caudal base disminuye, agravando el problema de sequía. Sin embargo existen soluciones factibles como la cosecha de agua. La mayor problemática se presenta si la temperatura de la zona aumenta y la precipitación disminuye, en este caso los caudales de los ríos serán menores, aumentando el problema de sequías en la época seca, indicando la necesidad de exportar agua de otras cuencas aledañas.

6.2 RECOMENDACIONES

Como se menciona en el actual proyecto han sido pocos los estudios realizados en el área de hidrología utilizando la herramienta SWAT. Con referencia a esto es recomendable utilizar el modelo en otras cuencas del país para comparar sus resultados y observar el comportamiento del modelo para ser adaptado a otras zonas del país, debido a que es un modelo desarrollado para Estados Unidos, algunas de sus funciones son complejas para adaptarse al país.

Con referencia a la posibilidad de insertar todas las estaciones, en foros se recomiendan herramientas para administrar la ubicación y datos de más de una estación, y de esta manera poder utilizarlas en SWAT. Se puede realizar un estudio enfocado en utilizar estas diversas herramientas, para así realizar modelaciones más completas en cuanto a datos meteorológicos.

Para posibles proyectos a futuro también se sugiere la utilización de diversos modelos, para poder realizar una comparación de cual se adapta a las condiciones de la zona de estudio, e incluso realizar comparación de resultados entre ellos.

Con respecto a las cuencas estudiadas, se sugiere un plan que regule la utilización de suelos y el cambio del mismo que se da con el tiempo, para que no existan modificaciones que provoquen problema aguas abajo de las zonas.

El cambio climático es una realidad prácticamente irreversible, la única solución que se puede recomendar para una posible escasez en la optimización del recurso hídrico, fomentando campañas del buen uso del agua, además de entrar en cobros razonables del agua.

Capítulo 7. BIBLIOGRAFÍA

- Arango Gutierrez, M., Branch Bedoya, J., & Botero Fernández, V. (2005). Clasificación no supervisada de coberturas vegetales sobre imágenes digitales de sensores remotos: “ LANDSAT – ETM + .” *Scielo*, 58, 2611–2634.
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., ... Jha, M. K. (2012). SWAT: model use, calibration and validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*, 55(4), 1491–1508.
- Arroyo Morales, L., Heidinger, H., & Araya Morales, E. J. (2010). *Modelo Hidrológico SWAT como Herramienta para Procesos de Toma de Decisión* (p. 12). San José.
- Bach, O. (2007). Informe Final Agricultura e implicaciones ambientales con énfasis en algunas cuencas hidrográficas principales. *Estado de La Nación*, XIII, 1–22.
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2008). *Balances Hídricos Mensuales Oferta y Demanda* (p. 154). San José.
- Benavides, F., & Veenstra, J. N. (2005). THE IMPACT OF TROPICAL DEFORESTATION ON RIVER CHEMICAL, 7(2), 180–187.
- Campos Aranda, D. (1998). *Procesos del ciclo hidrológico*. (San Luis Potosí : Universitaria Potosina, Ed.). San Luis Potosí. Retrieved from http://books.google.co.cr/books?id=tkUYqd0Aac8C&pg=SA1-PA2&dq=hidrologia&hl=es-419&sa=X&ei=MEuzU6uSCenIsATG9oGoDQ&redir_esc=y#v=onepage&q=hidrologia&f=false
- Carpena, R. M., & Rodríguez, A. R. (2005). *Hidrología Agroforestal* (p. 347).
- CATIE. (1995). *Modelación Hidrológica E Hidráulica en la Cuenca Del Río Caldera*. (H. Solís Bolaños & J. Cuevas Marín, Eds.). Panamá.
- Centro de Investigaciones Agronómicas CIA. Mapa de suelos (2014).
- Centro Virtual de Información del Agua. (2004). Retrieved February 16, 2014, from <http://www.agua.org.mx/>
- Chow, V. Te, Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología Aplicada*. (M. H. I. S.A., Ed.). Bogotá.
- Consultoría Agroindustrial (CAI). (1996). *Actualización del plan estratégico de integración de servicios en el distrito de riego arenal-tempisque* (p. 94).
- Cordero Montoya, R., Acevedo Mairena, H., & Calvo Alvarado, J. (2008). Cambio de la cobertura de la tierra para el Área de Conservación Tempisque 1998-2003, Guanacaste, Costa Rica. *Kurú*, 5(15).
- Correa, A., Sánchez, S., & Hernández, M. (2013). Análisis comparativo de los modelos hidrológicos SWAT y PATRICAL. *Tercer Congreso Nacional de Cuencas Hidrográficas*, 55–59.

- Douglas-Mankin, K. R., Srinivasan, R., & Arnold, J. G. (2010). SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT) MODEL: CURRENT DEVELOPMENTS AND APPLICATIONS. *American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASABE)*, 53(5), 1423–1431.
- Engel, B., Storm, D., White, M., Arnold, J., & Arabi, M. (2007). A Hydrologic/Water Quality Model Application Protocol. *Journal of the American Water Resources Association*, 43(5), 1223–1236. doi:10.1111/j.1752-1688.2007.00105.x
- Esquivel, G., Bueno, P., Sánchez, I., Velásquez, M., & Delgado, G. (2013). Eficiencia predictiva de modelos hidrológicos para cuencas poco instrumentadas. *Tercer Congreso Nacional de Cuencas Hidrográficas*, 57–62.
- Galván, L., Olías, M., Fernandez de Villarán, R., & J.M., D. S. (2007). Aplicación del modelo hidrológico SWAT a la cuenca del río Meca (Huelva , España). *GEOGACETA*, 42(1), 63–66.
- Gunther Vahrson, W., & Arauz, I. (1993). Aspectos morfoclimatológicos de la región Bahía de Culebra, Bahía El Coco, Guanacaste, Cost Rica. *Revista Geografica de America Central*, 27, 67–87.
- Guzmán Arias, I., & Calvo Alvarado, J. C. (2012). Water resources of the Upper Tempisque River Watershed , Costa Rica (Technical note). *Tecnología En Marcha*, 25(4), 8.
- Hesselbjerg Christensen, J., & Kumar Kanikicharla, K. (2013). *Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change*. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis*.
- Instituto Meteorológico Nacional (IMN). (2009). Clima en Costa Rica, Zona Norte. Retrieved March 17, 2015, from http://www.imn.ac.cr/educacion/climacr/zona_norte.html
- Kraemer, F. B., Chagas, C. I., Amábile, G. V., & Massobrio, M. J. (2011). Aplicación del modelo hidrológico SWAT en una microcuenca agrícola de la pampa ondulada, 29(1), 75–82.
- Leitón Montero, J. J. (2011). *Cambio en el patrón de escorrentía superficial de la cuenca alta del Tempisque ante diferentes escenarios de cambio climático*. Universidad de Costa Rica.
- Leiva, J. A., Mata, R., Rocha, O. J., & Gutiérrez Soto, M. V. (2009). Cronología de la regeneración del bosque tropical seco en Santa Rosa, Guanacaste, Costa Rica. I. Características edáficas. *Revista de Biología Tropical*, 57(3), 801–815.
- Madrigal Ballesteros, R. (2003). *Efecto de los incendios económicos y la acción colectiva sobre el uso del agua de irrigación en el distrito de riego arenal tempisque*. Escuela de Posgrado del CATIE.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, 50(3), 885–900.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2005). Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua Documentación Teórica.

- Neitsch, S. L., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2009). Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009.
- O'neal Coto, K. (2013). Experto en aguas visita Costa Rica. Retrieved from <http://www.ucr.ac.cr/noticias/2013/05/21/experto-en-aguas-visita-costa-rica.html>
- Organización para estudios Tropicales. (2001). *La Cuenca del Río Tempisque, perspectivas para un manejo integrado*. (J. Jiménez & E. González, Eds.) (1era ed., p. 150). San José.
- Parra Arango, J. L. (2005). *Modelo de simulacion. Sistema de produccion doble propósito*. (Litografía La Bastilla, Ed.) (p. 70). Colombia.
- Rojas Gonzáles, A. (2000). *Calibración y modelación hidrológica para el control de inundaciones en la cuenca del Río Turrialba, utilizando el Hec-HMS*. Universidad de Costa Rica.
- Romero Fernández, C. M. (2003). *Efectos ambientales de los volúmenes de agua generados por los excedentes de riego del Distrito de Riego Arenal sobre los humedales del Parque Nacional Palo Verde*. Universidad Estatal a Distancia.
- Salas Macías, A. (2011). *Comportamiento hidrológico y erosivo en usos de suelo prioritarios de la campiña lechera en Santa Cruz, Turrialba, Costa Rica*. CATIE. CATIE.
- Segura Bonilla, O. (2002). Agenda ambiental del agua en Costa Rica. *Revista Geografica de America Central*, 40, 39–49.
- SENARA. (2008). Senara region chorotega, distrito de riego arenal-tempisque. Retrieved from http://intranet.catie.ac.cr/intranet/posgrado/MC506/Docs_complementarios/DRAT-PIEDRAS-CSUR.pdf
- Suárez, C. (1999). Evaluacion de los procesos de generacion y transferencia de tecnologia (gtt), en el distrito de riego arenal- tempisque (drat) una propuesta de extension para mejorarlos (p. 9).
- Torres-Benites, E., Fernández-Reynoso, D., Oropeza-Mota, J. L., & Mejía-Saenz, E. (2004). Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, estado de México. *Terra Latinoamerica*, 22(4), 437–444.
- Uribe, N. (2010). (Soil and Water Assessment Tool) Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. Retrieved from <http://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>
- Votano, J., Parham, M., & Hall, L. (2004). *ESTUDIO HIDROMETEOROLOGICO DE LA CUENCA DEL RIO TEMPISQUE, GUANACASTE*. *Chemistry & ...*. INSTITUTO TECNOLOGICO DE COSTA RICA. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/cbdv.200490137/abstract>

ANEXO 1. CALIBRACION DE CONDUCTIVIDAD HIDRAULICA.

Identificador del suelo		SOL_K inicial (mm/h)	sube 300% (mm/h)
11	1	2,11	12,66
	2	3,19	19,14
	3	6,9	41,4
	4	45,16	270,96
	5	1,34	8,04
	6	108,2	649,2
	7	5,49	32,94
	8	6	36
16	1	2,24	13,44
	2	3,37	20,22
	3	4,9	29,4
	4	6,67	40,02
	5	9,16	54,96
	6	9,32	55,92
	7	0,84	5,04
19	1	5	30
	2	5,79	34,74
	3	5,79	34,74
	4	2,85	17,1
	5	3,76	22,56
	6	7,19	43,14
31	1	8,25	49,5
	2	16,54	99,24
	3	16,08	96,48
	4	42,27	253,62
	5	10,87	65,22
361	1	14,28	85,68
	2	15,06	90,36
	3	31,26	187,56
	4	28,97	173,82
365	1	24,44	146,64
366	1	2,21	13,26
	2	1,61	9,66
	3	0,89	5,34
386	1	10,99	65,94
	2	4,88	29,28
	3	4,83	28,98

387	1	0,15	0,9
	2	0,15	0,9
429	1	19,87	119,22
434	1	3,82	22,92
	2	1,72	10,32
	3	1,2	7,2
	4	1,43	8,58
442	1	1,01	6,06
	2	1,01	6,06
	3	0,89	5,34
	4	0,89	5,34
443	1	4,97	29,82
	2	2,93	17,58
91	1	16,35	98,1
	2	57,62	345,72
	3	77,73	466,38
	4	79,87	479,22
	5	47,52	285,12

ANEXO 2. DATOS DE ENTRADA PARA SIMULACIÓN DE CUENCA 1.

Water Balance:	
1.000	SFTMP : Snowfall temperature [°C]
0.500	SMTMP : Snow melt base temperature [°C]
4.500	SMFMX : Melt factor for snow on June 21 [mm H2O/°C-day]
0.000	SMFMN : Melt factor for snow on December 21 [mm H2O/°C-day]
1.000	TIMP : Snow pack temperature lag factor
1.000	SNOCOVMX : Minimum snow water content that corresponds to 100% snow cover [mm]
0.500	SNO50COV : Fraction of snow volume represented by SNOCOVMX that corresponds to 50% snow cover
2	IPET: PET method: 0=priest-t, 1=pen-m, 2=har, 3=read into model
	PETFILE: name of potential ET input file
0.100	ESCO: soil evaporation compensation factor
1.000	EPCO: plant water uptake compensation factor
5.000	EVLAI : Leaf area index at which no evaporation occurs from water surface [m2/m2]
0.500	FFCB : Initial soil water storage expressed as a fraction of field capacity water content
Modeling Options: Reaches	
1	IRTE: water routing method 0=variable travel-time 1=Muskingum
0.750	MSK_CO1 : Calibration coefficient used to control impact of the storage time constant (Km) for normal flow
0.250	MSK_CO2 : Calibration coefficient used to control impact of the storage time constant (Km) for low flow
0.200	MSK_X : Weighting factor controlling relative importance of inflow rate and outflow rate in determining water storage in reach segment
0	IDEG: channel degradation code
1	IWQ: in-stream water quality: 1=model in-stream water quality
basins.wwwq	WWQFILE: name of watershed water quality file
0.000	TRNSRCH: reach transmission loss partitioning to deep aquifer
1.000	EVRCH : Reach evaporation adjustment factor
0	IRTPEST : Number of pesticide to be routed through the watershed channel network
0	ICN : Daily curve number calculation method
1.000	CNCOEF : Plant ET curve number coefficient
1.400	CDN : Denitrification exponential rate coefficient
1.100	SDNCO : Denitrification threshold water content
0.150	BACT_SWF : Fraction of manure applied to land areas that has active colony forming units
10.000	BACTMX : Bacteria percolation coefficient [10 m3/Mg].
0.000	BACTMINLP : Minimum daily bacteria loss for less persistent bacteria [# cfu/m2]
0.000	BACTMINP : Minimum daily bacteria loss for persistent bacteria [# cfu/m2]
0.000	WDLPRCH : Die-off factor for less persistent bacteria in streams (moving water) at 20 C [1/day]
0.000	WDPRES : Die-off factor for persistent bacteria in streams (moving water) at 20 C [1/day]
0.000	WDLPRES : Die-off factor for less persistent bacteria in water bodies (still water) at 20 C [1/day]
0.000	WDPRES : Die-off factor for persistent bacteria in water bodies (still water) at 20 C [1/day]
0.000	TB_ADJ : New variable in testing ...Adjustment factor for subdaily unit hydrograph basetime
0.000	DEPIMP_BSN : Depth to impervious layer for modeling perched water tables [mm]
0.000	DDRAIN_BSN : Depth to the sub-surface drain [mm]
0.000	TDRAIN_BSN : Time to drain soil to field capacity [hours]
0.000	GDRAIN_BSN : Drain tile lag time [hours]
0.000862	CN_FROZ : Parameter for frozen soil adjustment on infiltration/runoff
0.000	DORM_HR : Time threshold used to define dormancy [hours]
1.000	SMXCO : Adjustment factor for maximum curve number S factor
0.500	FIXCO : Nitrogen fixation coefficient
20.000	NFIXMX : Maximum daily-n fixation [kg/ha]
0.200	ANION_EXCL_BSN : Fraction of porosity from which anions are excluded
0.000	CH_ONCO_BSN : Channel organic nitrogen concentration in basin [ppm]
0.000	CH_OPCO_BSN : Channel organic phosphorus concentration in basin [ppm]
5.000	HLIFE_NGW_BSN : Half-life of nitrogen in groundwater [days]
1.000	RCN_SUB_BSN : Concentration of nitrate in precipitation [ppm]
0.100	BC1_BSN : Rate constant for biological oxidation of NH3 [1/day]
0.100	BC2_BSN : Rate constant for biological oxidation NO2 to NO3 [1/day]
0.020	BC3_BSN : Rate constant for hydrolysis of organic nitrogen to ammonia [1/day]
0.350	BC4_BSN : Rate constant for decay of organic phosphorus to dissolved phosphorus [1/day]
0.010	DECR_MIN: Minimum daily residue decay
0.000	ICFAC: C-factor calculation method
0.300	RSD_COVCO : Residue cover factor for computing fraction of cover
5.000	VCRIT : Critical velocity
0	CSWAT : Code for new carbon routines
0.184	RES_STLR_CO : Reservoir sediment settling coefficient
0.750	BFLO_DIST 0-1 (1:profile of baseflow in a day follows rainfall pattern, 0:baseflow evenly distributed to each time step during a day)
1	IUH : Unit hydrograph method: 1=triangular UH, 2=gamma function UH
5.000	UHALPHA : alpha coefficient for gamma function unit hydrograph. Required if iuh=2 is selected

Master Watershed File: file.cio	
Project Description:	
General Information/Watershed Configuration:	
fig.fig	
9	NBYR : Number of years simulated
2005	IYR : Beginning year of simulation
1	IDAF : Beginning julian day of simulation
1	IDAL : Ending julian day of simulation
Climate:	
0	IGEN : Random number seed cycle code
1	PCPSIM : precipitation simulation code: 1=measured, 2=simulated
0	IDT : Rainfall data time step
0	IDIST : rainfall distribution code: 0 skewed, 1 exponential
1.300	REXP : Exponent for IDIST=1
1	NRGAGE: number of pcp files used in simulation
1	NRTOT: number of precip gage records used in simulation
1	NRGFIL: number of gage records in each pcp file
1	TMPSIM: temperature simulation code: 1=measured, 2=simulated
1	NTGAGE: number of tmp files used in simulation
1	NTTOT: number of temp gage records used in simulation
1	NTGFIL: number of gage records in each tmp file
2	SLRSIM : Solar radiation simulation Code: 1=measured, 2=simulated
0	NSTOT: number of solar radiation records in slr file
2	RHSIM : relative humidity simulation code: 1=measured, 2=simulated
0	NHTOT: number of relative humidity records in hmd file
2	WINDSIM : Windspeed simulation code: 1=measured, 2=simulated
0	NWTOT: number of wind speed records in wnd file
0	FCSTYR: beginning year of forecast period
0	FCSTDAY: beginning julian date of forecast period
0	FCSTCYCLES: number of time to simulate forecast period