



CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA

ESCUELA DE POSGRADO

**Análisis del comportamiento del recurso hídrico ante cambios
en el uso del suelo y el cambio climático en la cuenca del río
Pejibaye, Costa Rica**

por

Carlos Alberto Zuleta Salmon

Tesis sometida a consideración por el Programa de Posgrado
como requisito para optar por el grado de

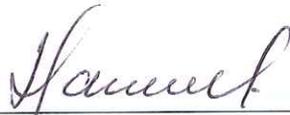
Magister Scientiae en Manejo y Gestión Integral de Cuencas
Hidrográficas

Turrialba, Costa Rica, 2013

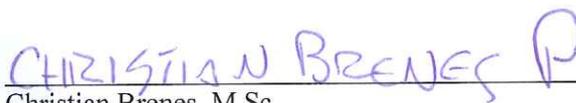
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y el Programa de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN MANEJO Y GESTIÓN INTEGRAL
DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS**

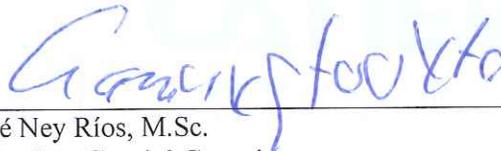
FIRMANTES:



Jorge Faustino, Ph.D.
Codirector de tesis



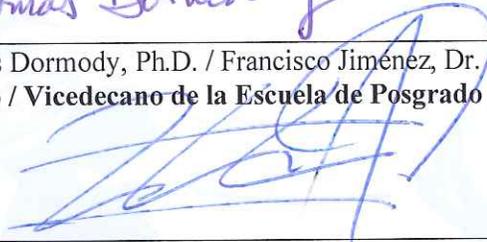
Christian Brenes, M.Sc.
Codirector de tesis



José Ney Ríos, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Thomas Dormody, Ph.D. / Francisco Jiménez, Dr. Sc.
Decano / Vicedecano de la Escuela de Posgrado



Carlos Alberto Zuleta Salmon
Candidato

ORGANIZACIÓN Y ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El presente documento está constituido por dos secciones. La primera, formada principalmente por una parte introductoria, donde se definen la importancia, los objetivos y el alcance del este estudio, y seguidamente se encuentra una revisión del "estado del arte" o del conocimiento en el tema específico de investigación, incluyendo los abordajes metodológicos utilizados para su estudio.

La segunda sección (en formato de artículo científico), está integrada por los materiales y métodos utilizados, los resultados obtenidos y las conclusiones a las que el autor llegó después del análisis de los resultados arrojados en el presente estudio.

DEDICATORIA

*A mis padres y hermana por todo su apoyo en el desarrollo de esta maestría.
A mi familia en Ecuador, quienes siempre confiaron en que alcanzaría mis metas.*

A Andrea, mi soporte, felicidad y compañera.

A Misael y Enrique, que Dios los tenga en su gloria.

A la Mandarina Mecánica:

“Con esfuerzo y humildad, todo está al alcance de tus manos”.

AGRADECIMIENTOS

Al PhD. Jorge Faustino por brindarme su orientación y excelentes consejos, además, por ser una gran persona y docente. Definitivamente un honor el haber aprendido tanto de usted.

Al MSc. Christian Brenes "El Profe", al cual agradezco por su paciencia, orientación y apoyo en este trabajo. De igual manera, por su amistad y compromiso incondicional dentro y fuera de la cancha.

Al MSc. José Ney Ríos, infinitas gracias por el apoyo y el tiempo invertido, la gran predisposición, sus valiosos consejos, su amistad y por compartir conmigo de manera desinteresada sus conocimientos. Gracias por enseñarme que *"No son las pérdidas, ni las caídas, las que hacen fracasar la vida del hombre, si no la falta de coraje y humildad, para levantarse y seguir adelante..."* VM S.A.W

Al PhD. Francisco Jiménez, profesor y amigo, gracias por sus consejos, sencillez y apoyo durante estos dos años de maestría.

A la familia Zamora Trejos (Mi familia en Costa Rica), quienes siempre me recibieron con agrado y me brindaron su apoyo.

Al MSc. Freddy Argotty, infinitas gracias por tu paciencia y apoyo técnico desinteresado en la consecución de este trabajo. Además, por tu sincera amistad, sencillez y consejos.

Al ICE y la COMCURE por brindarme la información necesaria para desarrollar esta investigación.

A mis amigos dentro y fuera del CATIE, el tiempo compartido con ustedes ha sido sumamente enriquecedor, gracias por su apoyo y amistad.

A todos los que hicieron posible mi estancia en Costa Rica para realizar mi maestría, especialmente para el Programa de becas de la Secretaría Nacional de Educación Superior, Ciencia Tecnología e Innovación del Ecuador (SENESCYT).

CONTENIDO

DEDICATORIA	IV
AGRADECIMIENTOS	V
CONTENIDO	VI
LISTA DE CUADROS	VIII
LISTA DE FIGURAS	IX
LISTA DE ACRÓNIMOS, ABREVIATURAS Y UNIDADES	X
RESUMEN	XI
SUMMARY	XII
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos del estudio.....	2
1.1.1 Objetivo general	2
1.1.2 Objetivos específicos	2
1.2 Preguntas de investigación	3
2. MARCO REFERENCIAL	3
2.1 El ciclo hidrológico en la cuenca.....	3
2.2 Modelamiento hidrológico.....	6
2.3 Cambios de uso del suelo	7
2.4 Cambio climático.....	7
2.5 Sistemas de Información Geográfica (SIG) Aplicados al Recurso Hídrico	9
2.6 Modelos de cambio de uso del suelo	10
2.6.1 CA_MARKOV (Cellular Automata Markov)	11
2.7 Modelo hidrológico	11
2.7.1 Modelo hidrológico SWAT	11
2.7.2 Calibración del modelo SWAT	13
2.8 Resultados y conclusiones relevantes	15

2.9 Literatura citada	16
3. ARTICULO: ESTIMACIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y EL CAMBIO EN EL USO DEL SUELO EN EL CAUDAL DE LA CUENCA DEL RÍO PEJIBAYE – COSTA RICA, MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT.	21
3.1 Introducción.....	23
3.2 Materiales y métodos.....	24
3.2.1 Área de estudio.....	24
3.3 Procedimiento metodológico.....	24
3.3.1 Modelo hidrológico SWAT	24
3.3.2 Modelo de elevación digital (DEM).....	26
3.3.3 Mapa de suelos.....	26
3.3.4 Mapas de uso del suelo	27
3.3.5 Mapa de uso del suelo proyectado al 2030.....	30
3.3.6 Datos climáticos.....	31
3.3.7 Configuración del modelo SWAT	33
3.3.8 Calibración del modelo SWAT.....	34
3.3.9 Escenarios de cambio climático para el modelo SWAT	37
3.4 Resultados y discusión	38
3.4.1 Cambio de uso del suelo.....	38
3.4.2 Modelación de mapa de uso del suelo para el 2030.....	39
3.4.3 Calibración del modelo SWAT.....	41
3.4.4 Efectos del cambio climático y el cambio de uso del suelo en los caudales de la cuenca del río Pejibaye al 2030	45
3.5 Conclusiones	59
3.6 Recomendaciones.....	61
3.7 Literatura citada	62

LISTA DE CUADROS

Tabla A. 1 Cambios proyectados en temperatura y precipitación para Costa Rica (B2).....	9
Tabla B. 1 Cambios proyectados en temperatura y precipitación para Costa Rica (A2).....	9
Tabla 1. Categorías de uso de suelo en la cuenca del río Pejibaye años 1998 y 2011.	28
Tabla 2. Datos Hidrometeorológicos para la Cuenca del río Pejibaye.	31
Tabla 3. Estaciones Hidrometeorológicas usadas para el estudio de la Cuenca.	32
Tabla 4. Uso del Suelo (2011), Suelo y Pendientes reclasificados para el modelo SWAT.	34
Tabla 5. Valores de ajuste de parámetros para calibración del modelo por estaciones.	36
Tabla 6. Simulaciones con escenarios de Cambio Climático y Cambio de Uso del Suelo	37
Tabla 7. Cambio de Uso del Suelo periodo 1998 - 2011.	38
Tabla 8. Cambio de Uso del Suelo periodo 2011 - 2030.	39
Tabla 9. Probabilidades de transición de uso del suelo esperadas para el 2030.	40
Tabla 10. Efectos del CC y el CUS en la cuenca del río Pejibaye al 2030.	51

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del área de estudio	26
Figura 2. DEM cuenca del río Pejibaye	27
Figura 3. Suelo cuenca del río Pejibaye	27
Figura 4. Uso del Suelo cuenca del río Pejibaye 1998	30
Figura 5. Uso del Suelo cuenca del río Pejibaye 2011	30
Figura 6. Climograma de la Cuenca del río Pejibaye (1980 - 2011) por estaciones.	32
Figura 7. Caudales promedio cuenca del río Pejibaye (1980 - 2011) por estaciones.	33
Figura 8. Uso del Suelo proyectado de la cuenca del río Pejibaye al 2030	40
Figura 9. Calibración de caudales en la cuenca alta (Est. Humo) del río Pejibaye.	43
Figura 10. Calibración de caudales cuenca media-baja (Est. Oriente) del río Pejibaye.	43
Figura 11. Caudales Simulados vs. Observados en la cuenca alta del río Pejibaye.	44
Figura 12. Caudales Simulados vs. Observados. Cuenca media - baja del río Pejibaye.	44
Figura 13. Proyección de precipitación promedio diaria (mm) y temperatura media diaria (°C) según GCM HadCM3 al 2030.	45
Figura 14. Proyección de caudal promedio anual (m ³) según GCM HadCM3 al 2030.	48
Figura 15. Caudal promedio mensual (m ³) HadCM3 al 2030 vs. Escenario BASE (2011).	49
Figura 16. Caudal promedio por subcuencas (m ³) según GCM HadCM3 al 2030 y escenario BASE (2011) en la cuenca del río Pejibaye.	50
Figura 17. Efectos del CC y el CUS en la cuenca del río Pejibaye al 2030.	52
Figura 18. Efectos del CC y el CUS por subcuenca en el río Pejibaye al 2030.	55
Figura 19. <i>Tasa de cambio promedio por escenario climático al 2030 respecto al 2011.</i>	57

LISTA DE ACRÓNIMOS, ABREVIATURAS Y UNIDADES

CA_MARKOV	Modelo Celular Automata – Cadenas de Markov
CC	Cambio Climático
CEPAL	Comisión Económica Para América Latina y el Caribe
CIAT	Centro Internacional de Agricultura Tropical
COMCURE	Comisión de Manejo de la Cuenca Alta del Río Reventazón
CUS	Cambio de Uso del Suelo
DEM	Modelo de Elevación Digital (Digital Elevation Model)
GCM	Modelo de Circulación General (General Circulation Model)
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GPS	Sistema de Posicionamiento Global (Global Positioning System)
ICE	Instituto Costarricense de Electricidad
IMN	Instituto Meteorológico Nacional
INEC	Instituto nacional de Estadística y Censos de Costa Rica
IPCC	Panel Intergubernamental para el Cambio Climático
LIDAR	Detección y Medición a través de la Luz (Light Detection and Ranging)
MGICH	Manejo y Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PREVDA	Programa de Reducción de la Vulnerabilidad y Degradación Ambiental
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SWAT	Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua (Soil and Water Assessment Tool)
SWAT-CUP	Procedimientos de Calibración de Incertidumbres del modelo SWAT (SWAT Calibration Uncertainty Procedures)
SUFI-2	Ajuste Secuencial de Incertidumbres (Sequential Uncertainty Fitting ver. 2)
URH	Unidad de Respuesta Hidrológica

RESUMEN

Dentro de la gestión integrada de cuencas hidrográficas, la estimación de los caudales es esencial para evaluar su rendimiento potencial del agua con la finalidad de planificar las medidas de conservación del recurso hídrico, incluyendo zonas de recarga hídrica, , reducción de la sedimentación y riesgos de inundación aguas abajo. Ante este contexto, es necesaria la modelación de la precipitación y comportamiento de los caudales por medio de un modelo hidrológico, el cual debe ser calibrado adecuadamente con el fin de proporcionar información sistemática y coherente sobre la disponibilidad futura de los recursos hídricos en la cuenca. En el presente estudio se utilizó el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para la estimación del caudal al año 2030, bajo diferentes escenarios de cambio climático y cambio del uso del suelo en la cuenca del río Pejibaye en Costa Rica. Esta cuenca de 250 km², cubierta principalmente por Bosque denso (80%), es de gran interés para el sector hidroeléctrico del país, al ser una de las principales unidades hidrográficas del país con un aporte en caudal promedio anual de 34m³/s al proyecto hidroeléctrico Angostura. El mapa de uso del suelo para el año 2030 fue estimado mediante el modelo CA_Markov utilizando los mapas de uso del suelo del año 1998 y 2011, generados a partir de fotos aéreas e imágenes satelitales respectivamente. El modelo SWAT fue calibrado, mediante SWAT-CUP, en dos lugares (Parte Alta y Media – Baja de la cuenca) con datos mensuales observados de caudal para el periodo 1980 – 2011, obteniéndose una bondad de ajuste del modelo calificada como excelente (NSE: 0.8; R2: 0.82). Las simulaciones realizadas, Escenarios A2 y A1B- modelo de circulación global HadCM3, fueron realizadas para el periodo 2012 – 2030 y con dos escenarios de uso del suelo (Uso 2011 y Uso 2030). Todas las combinaciones estimaron un descenso en los caudales para el año 2030 en relación al año 2011 (escenario BASE), las simulaciones con escenarios A2 muestran reducciones más drásticas (-49.7%) en el caudal en comparación a la simulación bajo el escenario A1B (-25.3%). Estas variaciones en el caudal se relacionan principalmente con cambios en la temperatura y la precipitación, que con los cambios en el uso del suelo en la cuenca. El alto grado en la incertidumbre de los modelos de circulación global debe tenerse en cuenta al evaluar los futuros impactos potenciales y la toma de decisiones sobre las acciones para la adaptación al cambio climático en la zona. Sin embargo, este es un primer buen punto de partida para la planificación y el manejo integrado de la cuenca.

Palabras clave: SWAT, SWAT-CUP, CA_MARKOV, Manejo Integrado de Cuencas, Cambio Climático, Cambio de Uso del Suelo, Calibración Multi-sitio, Modelación Hidrológica, Caudal, Pejibaye, Costa Rica.

SUMMARY

Within the integrated watershed management, estimation of flows is essential for evaluating the performance potential of water in a river basin, for planning resource conservation measures, including the recharge of groundwater areas and reducing sedimentation and downstream flooding risks. This requires the modeling of precipitation and flows through a properly calibrated hydrological model in order to provide consistent and coherent information about the future availability of water resources in the basin. In the present study used the SWAT model (Soil and Water Assessment Tool) for estimating flow in 2030, in front of the effects of climate change and land use change in Pejibaye River watershed in Costa Rica. This watershed, of 250 km², is mainly dense forest cover (80 %), is of great interest to the country's hydropower sector, being one of the main contributors to Angostura hydroelectric project. The land use map for the year 2030 was estimated by the CA_Markov model using the land use maps of 1998 and 2011, generated from aerial photographs and satellite images, respectively. The SWAT model was calibrated in two places (Highlands and Media - Bottom of the watershed) by SWAT-CUP, with observed monthly flow data for the period 1980-2011, with an efficiency of the adjusted model rated as excellent (NSE : 0.8 , R2: 0.82) . Subsequently, were performed simulations with two emission scenarios (A2 and A1B) from the HadCM3 global circulation model for the period 2012-2030 and with two scenarios of land use (Map 2011 and 2030). All combinations estimated a decrease in flow for the year 2030 compared to 2011 (BASE scenario), the A2 scenario simulations show drastic reductions (-49.7 %) in flow compared to simulations with A1B scenarios (-25.3 %). These variations in the flow are mostly related to changes in temperature and precipitation, with the changes in land use in the watershed. The high degree of uncertainty in global circulation models should be considered when evaluating potential future impacts and decisions on actions for climate change adaptation in the area. However, this is a good starting point for planning and integrated management of the watershed.

Keywords: SWAT, SWAT-CUP, CA_MARKOV, Integrated Watershed Management, Climate Change, Land Use, Multi-Site Calibration, Hydrologic Modeling, Flow, Pejibaye, Costa Rica.

1. INTRODUCCIÓN

El agua es el recurso natural máspreciado y es el primer y principal componente de toda la materia viva en el planeta tierra (ONU-Agua, 2010). Desde el enfoque del manejo y la gestión de cuencas hidrográficas – MGICH, que reconoce que la cuenca es la unidad para la gestión de los recursos hídricos, el agua es considerada como el elemento central a partir del cual se articulan los demás componentes que funcionan como un sistema interconectado e indivisible en un territorio delimitado naturalmente; bajo este principio los fines de la MGICH enfatizan acciones tendientes a garantizar el abastecimiento de agua en calidad y cantidad, la sostenibilidad de los recursos asociados suelo, bosque y biodiversidad y el mantenimiento de las dinámicas existentes (Cervantes et al. 2009).

Dentro de la gestión integrada de cuencas hidrográficas, la estimación de los caudales es esencial para evaluar el rendimiento potencial del agua de una cuenca hidrográfica, para planificar las medidas de conservación, incluyendo la recarga de las zonas de agua subterránea, la reducción de la sedimentación y los riesgos de inundación aguas abajo (Lenhart et al. 2002). La cuenca del río Pejibaye tiene un área de 250 km², integra la parte media – alta del sistema hidrográfico del río Reventazón, es de gran importancia para Costa Rica ya que es una de las principales aportantes (promedio anual: 34 m³/s) para el proyecto Hidroeléctrico Angostura, el cual, en combinación con el complejo hidroeléctrico Cachí – Río Macho producen el 32% de la hidroelectricidad nacional (ICE, 2009). Es por ello la importancia de conocer la modelación del comportamiento hidrológico en la cuenca mediante el uso de un modelo hidrológico validado y calibrado con el fin de proporcionar información sistemática y coherente sobre la disponibilidad futura de agua en la cuenca.

Las predicciones de variación climática, son relevantes para una buena planificación del recurso hídrico (Candela et al. 2009); sin embargo, el comportamiento futuro de los recursos hídricos en una cuenca debe ser estudiado en base a los efectos combinados de los cambios del clima y el cambio de uso del suelo (Juckem et al. 2008). Al analizar los diferentes escenarios de cambio de uso del suelo se pueden entender los vínculos entre los procesos socioeconómicos y el manejo de los recursos naturales (Turner y Meyer 1991); los mismos que pueden ser cuantificados eficientemente con Sistemas de Información Geográfica (SIG) y técnicas de percepción remota (Brown et al. 2000); de igual manera, los modelos estocásticos (como el CA_MARKOV) se convierten en una herramienta útil para evaluar la dinámica espacial a partir de matrices de transiciones de coberturas de uso (Aaviksoo 1993; Weng 2002; Ruiz Benito et al. 2010; Kamusoko et al. 2011); además, estos modelos presentan resultados fiables para simular los cambios futuros en el uso del suelo (Aaviksoo 1993; Soares-Filho et al. 2004; Teixeira et al. 2009), proporcionando información visual y cuantitativa (Soares-Filho et al. 2004) utilizada para la gestión del territorio (Ruiz Benito et al. 2010). Por otro lado, la modelación hidrológica nos permite comprender los impactos de estos cambios en el uso

del suelo sobre los componentes del balance hídrico en una cuenca, proporcionando una serie de factores que deben ser considerados para el manejo y gestión del recurso hídrico tanto en el presente como en el futuro.

Bajo este contexto, los estudios hidrológicos son un requisito primordial para la formulación y desarrollo de proyectos sostenibles con la finalidad de comprenderse la posible variación del recurso hídrico ante la variabilidad climática, el incremento en la explotación del recurso hídrico, cambios en el uso del suelo, el crecimiento poblacional y económico, etc. Además, deben evaluar los impactos que puedan generar las diferentes alternativas de manejo en la cuenca, permitiendo identificar alternativas en pro de un efectivo planteamiento de estrategias de adaptación al cambio climático y la gestión integrada del recurso hídrico.

Actualmente existen diversos modelos hidrológicos, sin embargo, pocos son capaces de analizar diferentes medidas alternativas que permitan una adecuada gestión del agua en una cuenca y a su vez, que contribuyan a tomar decisiones para la planificación del recurso hídrico, mediante la simulación de escenarios climáticos y cambios en el uso del suelo (Notter et al. 2007). Uno de estos modelos hidrológicos es el SWAT (Soil and Water Assessment Tool), el cual se ha venido utilizando en diferentes cuencas alrededor del mundo a diferente escala y donde se han evaluado impactos hidrológicos debido al uso del agua y de la tierra (Prochnow et al, 2008; Schilling et al., 2008), fuentes contaminantes (Schilling y Wolter, 2009), impactos del cambio climático (Stone et al., 2001), potencial de la energía hidroeléctrica (Kusre et al., 2010), erosión del suelo (Shen et al., 2009) y buenas prácticas de manejo en los suelos (Gassman et al., 2007).

El objetivo de esta investigación es analizar el comportamiento futuro del recurso hídrico en la cuenca del río Pejibaye ante los efectos del cambio climático y el cambio de uso del suelo con la finalidad de contribuir en el manejo y gestión integrada del recurso hídrico en la cuenca.

1.1 Objetivos del estudio

1.1.1 Objetivo general

Analizar el comportamiento del recurso hídrico de la cuenca del río Pejibaye, bajo escenarios de cambio de uso de suelo y climáticos, como un aporte a la posterior planificación del recurso hídrico en la cuenca.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Identificar los cambios en el uso del suelo y en el clima para el año 2030 en la

cuenca del río Pejibaye.

2. Analizar los posibles impactos sobre el caudal de la cuenca del río Pejibaye, asociados a escenarios actuales y futuros de cambios en el uso del suelo y el cambio climático.

1.2 Preguntas de investigación

1.2.1 Objetivo 1

- ¿Cuál es la proyección de cambio de uso del suelo en la cuenca del río Pejibaye para el año 2030?
- ¿Cuál es la proyección de cambio en el clima de la cuenca del río Pejibaye para el año 2030?

1.2.2 Objetivo 2

¿De qué manera se verá afectado el caudal de la cuenca del río Pejibaye ante los efectos combinados de los diferentes escenarios de cambio climático y cambio en el uso del suelo en el año 2030?

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 El ciclo hidrológico en la cuenca

Se describe al ciclo hidrológico como el conjunto de cambios que experimenta el agua en la naturaleza, tanto en su estado (sólido, líquido, gaseoso), como en su forma (agua superficial, agua subterránea, etc.). El ciclo hidrológico es completamente irregular, y es precisamente contra estas irregularidades que lucha el ser humano. Una muestra de ello son los periodos de satisfacción con los requerimientos del agua para las diferentes actividades, otros periodos de sequías y otros de inundaciones (Villón 2004). El ciclo hidrológico está conformado por los siguientes componentes:

- **Precipitación**

Desde el punto de vista hidrológico, la precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre; sus mediciones y análisis forman el punto de partida de los estudios concernientes al uso y control del agua (Villón 2004).

No toda el agua precipitada llega a la superficie de forma directa, hay una parte de ella que es interceptada en su trayecto; esta interceptación la realizan las plantas, por lo que se puede diferenciar dos términos, la precipitación incidente y la precipitación neta (Tobón et al 2009).

La precipitación incidente es la cantidad total de lluvia que es medida por encima de la copa de los árboles o en un terreno abierto adyacente al bosque (De Paula Lima 2008). Mientras que la precipitación neta está compuesta por las gotas de agua que caen o drenan al suelo desde el follaje y las ramas o que se escurren a través de los troncos. La diferencia entre la precipitación neta con la incidente es conocida como intercepción de la precipitación (Tobón et al 2009).

- **Evapotranspiración**

Es el resultado del proceso en donde el agua cambia de estado líquido a gaseoso directamente (evaporación) y a través de la actividad metabólica de las plantas y animales (transpiración). Esta humedad es transferida de regreso a la atmósfera en forma de vapor. Es pues la suma de la evaporación y de la transpiración y es mayor cuanto más densa sea la cobertura de vegetación por unidad de área (Mora y Valverde 2005).

- **Infiltración y Percolación**

La infiltración es el paso del agua a través de la superficie del suelo hacia el interior de la tierra; mientras que la percolación es el movimiento del agua dentro del suelo, ambos fenómenos, están íntimamente ligados puesto que, la primera no puede continuar sino cuando tiene lugar la segunda (Chereque 1996).

- **Escorrentía**

El escurrimiento se define como el agua proveniente de la precipitación que circula sobre o bajo la superficie terrestre y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca (Villón 2004).

- **Flujo Lateral**

El flujo lateral es el agua que se mueve por debajo de la superficie del suelo y sobre el nivel de los acuíferos, la cual fluye subsuperficialmente y alimenta los canales de drenaje, ríos, lagos. El flujo subsuperficial lateral es calculado simultáneamente con la percolación para el perfil del suelo entre (0-2m) mediante un modelo de almacenamiento cinético, que usa la ecuación de conservación de la masa con el perfil entero del suelo como el volumen de control (Proaño *et al.* 2006).

El balance hidrológico es la cuantificación de las componentes del ciclo hidrológico en las cuencas hidrográficas o de cuerpos de agua subterráneas. Su propósito es determinar los principales flujos hídricos en las cuencas (Jimenez 2011). El balance hídrico es la aplicación del principio de la igualdad de las masas con respecto al flujo de agua, en un sistema determinado (Díaz et al 2005), es decir, en un espacio

geográfico en el cual se examina el ciclo hidrológico, dado que el agua no puede ser creada ni destruida en dicho espacio; este balance puede ser expresado en términos de:

$$\text{Flujo de entrada} - \text{Flujo de Salida} = \text{Relación de cambio de agua almacenada}$$

La cuantificación del balance hídrico es normalmente complicada, pues la falta de medidas directas, la variación espacial de las variables (tales como precipitación, evapotranspiración), las pérdidas profundas (a acuíferos) y las variaciones del agua almacenada son una limitación en este proceso, sin embargo, como respuesta a estas dificultades, de manera general se admiten dos premisas: la primera supone que las pérdidas profundas son despreciables (se considera que una cuenca es impermeable) y la segunda admite que las variaciones del agua almacenada en la cuenca hidrográfica son despreciables para un periodo normalmente largo (Faustino 2012).

Así, una forma práctica de calcular el balance hídrico en una cuenca, es considerar que el agua entra, se almacena y sale de la cuenca de acuerdo a la siguiente expresión matemática:

$$SW_t = SW + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i)$$

De donde, SW_t es el contenido de agua en el suelo en el día t medido en mm; SW es la cantidad inicial de contenido de agua en el suelo (mm); t es el tiempo en días; R la precipitación diaria (mm), Q la cantidad de escorrentía diaria (mm), ET evapotranspiración diaria (mm), P percolación diaria (mm) y QR el flujo de retorno o flujo base (mm) (Bonini y Guzmán 2003).

El clima de una cuenca hidrográfica proporciona las entradas de humedad y energía, que controlan el equilibrio del agua y determinan la importancia relativa de los diferentes componentes del ciclo hidrológico. De modo que cuando se produce una precipitación, esto puede ser interceptado y contenido en el dosel de vegetación o caer a la superficie del suelo, y esto se infiltra en el perfil del suelo o fluirá sobre el terreno como escorrentía, moviéndose hacia un cauce y contribuyendo a la formación de los ríos. Por otra parte, el agua infiltrada puede ser contenida en el suelo y evapotranspirada o puede avanzar lentamente al sistemas de aguas subterráneos (Neitsch et al. 2005a;b).

La evapotranspiración es un término colectivo para todos los procesos donde el agua en la fase líquida o sólida o cerca de la superficie terrestre se convierte en vapor atmosférico. Los que incluye la evaporación de ríos y lagos, suelos desnudos, y superficies vegetativas; principalmente por efecto de la temperatura del suelo y el aire (Neitsch et al. 2005a, b).

Por otra parte, el agua subterránea se forma principalmente a través de la

infiltración/percolación, también puede ocurrir la recarga por filtración de cuerpos de aguas superficiales. El agua subterránea puede dividirse en dos sistemas de acuíferos: un acuífero superficial y libre (acuífero no confinado), cuyo límite es nivel freático, que contribuye al flujo de regreso a la corrientes dentro de la cuenca hidrográfica y un acuífero profundo y limitado (acuífero confinado) es aquel que está delimitado por encima y abajo por formaciones geológica, que contribuye al flujo de regreso a las corrientes fuera de la cuenca (Arnold et al. 1998; Arnold y Fhorer 2005; Neitsch *et al.* 2005a, b).

Los acuíferos se recargan principalmente a través de la precipitación en suelos con alta capacidad de infiltración o rocas superficialmente permeables. Las áreas de recarga de los acuíferos pueden o no estar a grandes distancias de donde son explotados (Juckem *et al.* 2008).

2.2 Modelamiento hidrológico

Se define como un sistema matemático o físico que obedece a ciertas condiciones específicas y cuyo comportamiento es utilizado para entender un sistema físico, biológico o social (Solis *et al.* 1993).

Los modelos hidrológicos constituyen hoy día una de las herramientas más útiles en la planificación de recursos hídricos. El rápido desarrollo de la industria de la computación ha hecho posible que los micro-computadores sean cada vez más accesibles y con mayor capacidad para manejar programas complejos y voluminosas bases de datos en menor tiempo que lo que era posible en los años sesenta cuando se iniciaron los primeros modelos digitales (Mattos et al. 2010).

El trabajar con un modelo para simulación hidrológica y la posibilidad de reproducir todos los componentes del ciclo hidrológico con la ayuda de los sistemas de información geográfica, permite a los investigadores crear escenarios tanto para condiciones presentes y/o futuras, determinando cómo afectará el cambio de una u otra variable en la producción de caudales y sedimentos en determinada cuenca (Proaño et al. 2006).

En la actualidad existen varios modelos hidrológicos, la importancia de estos radica en que, una vez calibrados o validados, pueden ser utilizados para simular diversas situaciones o para extender la información existente. En manejo de cuencas tienen gran utilidad ya que se puede simular la respuesta de la cuenca ante cambios en el uso de la tierra, cambio climático y prácticas de conservación de suelos dentro de las cuencas (Mattos et al. 2010).

2.3 Cambios de uso del suelo

La humanidad ha mostrado a lo largo de su evolución la tendencia a modificar los ecosistemas terrestres, los cambios del uso del suelo (CUS) son considerados entre las principales fuerzas que inciden en los desequilibrios ambientales, por lo que el uso de herramientas de modelación del cambio de uso del suelo permiten proyectar y explorar escenarios prospectivos, comprender los procesos clave y su descripción en términos cuantitativos (Mas y Sandoval, 2011).

El cambio de uso del suelo, consiste en la transición de una categoría por otra, como es el caso la deforestación, la expansión agrícola o el cambio en la extensión urbana, y está en función de la presión sobre los recursos, oportunidades, políticas, vulnerabilidad, y la organización social; estas funciones tienen una fuerte interacción que causan el cambio de uso del suelo (Lambin et al. 2001, 2006).

Los impactos del cambio de uso del suelo pueden evidenciarse mediante las variaciones en la hidrología de la cuenca, y su equilibrio está en función de la distribución de la vegetación y su interacción con el agua y el suelo, donde, cualquier alteración viene a modificar el ciclo hidrológico (Guo *et al.* 2008; Juckem *et al.* 2008; Li *et al.* 2009). De igual manera, la conversión de los bosques para agricultura o pastos, pueden provocar problemas relacionados con escasez del agua en periodos de sequía y la erosión de las laderas e inundaciones en estaciones lluviosas (Notter *et al.* 2007; Guo *et al.* 2008; Mango *et al.* 2011).

Por otro lado, algunos estudios muestran que la disminución del agua puede estar más afectada por la variabilidad climática que por el cambio de uso del suelo, sin embargo, la relación de la extensión de los cambios de uso del suelo pueden ser otro factor determinante (Li *et al.* 2009). Asimismo, el cambio del uso del suelo en la cuenca puede impactar directamente en el balance hídrico llegando a disminuir en más de un 9% las descargas de las aguas subterráneas y en un 3% del total de producción de agua superficial (Mango *et al.* 2011).

2.4 Cambio climático

Según el IPCC (2007), la variabilidad climática está dada por las variaciones en el *"...estado medio u otras características estadísticas del clima (desviaciones típicas, fenómenos extremos, etc.)..."*, lo cual según Lavell (2011), quien señala esta misma fuente, hace referencia a una escala temporal y territorial, más allá de eventos individuales del tiempo y que puede relacionarse con procesos internos naturales del sistema clima (variabilidad interna) o con variaciones en factores naturales o antropogénicos (variabilidad externa).

La variabilidad climática determina además dos aspectos importantes, el primero

dado por los promedios de las variables climáticas que permiten definir el tipo de clima en un determinado sitio (latitud media templada; trópico-húmedo; trópico-seco, etc.) y el segundo dado por las facetas del clima que desobedecen la norma, denominados éstos como "extremos" (huracanes, tornados, sequías etc.), que aun cuando son procesos naturales, marcan los aspectos más notorios de la variabilidad (Lavell 2011).

En cuanto a cambio climático, éste está definido como el cambio en la tendencia de las variables climáticas (y en su variabilidad), y es caracterizada por una alteración, ya sea por encima o por debajo, de su valor promedio, y que generalmente está acompañada de cambios en los tipos, regularidad y características de las anomalías o extremos (Lavell 2011; González et al. s.f.).

Para el IPCC (2007), el cambio climático, se refiere a la *"variación en el estado del clima identificable (por ejemplo, mediante el uso de pruebas estadísticas), en las variaciones del valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste durante un período prolongado, generalmente decenios o incluso más...";* estos cambios pueden producirse debido a *"...procesos internos naturales o a forzamientos externos o a cambios antropogénicos persistentes de la composición de la atmósfera o del uso de la tierra"*.

Centroamérica ha presentado una alta variabilidad climática en años recientes. En las últimas décadas se han observado importantes cambios en precipitación y aumentos de temperatura. Las tendencias de los niveles de precipitación muestran una disminución, sobre todo en la región oeste del istmo y un aumento de la temperatura en alrededor de 1 °C en Mesoamérica (CEPAL. 2011). Según el IPCC (2007a, b), se pronostican aumentos de temperatura, avance de tierras áridas, disminución de biodiversidad y bajos niveles de agua en los suelos, implicando una baja en los diferentes eslabones de las cadenas de producción. La tendencia de las lluvias producto de la observación de varias estaciones de datos, indican tendencia hacia veranos con mayores sequías, principalmente en la región de Centro América y el Caribe. Aguilar et ál. (2005) reafirman esta teoría al señalar que la temperatura y la precipitación durante los últimos 40 años en América Central y norte de Sudamérica se ha visto seriamente afectada por la variabilidad que existe en el cambio de los eventos extremos climáticos.

En las tablas A y B, se presentan los resultados de escenarios de cambio climático en temperatura y precipitación generados a nivel de Costa Rica según el escenario B2 (que hace alusiones a un mundo basado en soluciones locales para la sostenibilidad socioeconómica y ambiental) y A2 (se mantiene igual el crecimiento económico y poblacional) con los modelos HADCM3, GFDLR30 y ECHAM4 (CEPAL 2011).

Tabla A. 1 Cambios proyectados en temperatura y precipitación para Costa Rica (B2)

Modelos	Cambios en temperatura °C		
	2030	2050	2100
HADCM3	1.0	1.2	3.1
GFDLR30	0.9	1.3	1.9
ECHAM4	0.6	1.2	2.2
Modelos	Cambios en precipitación (%)		
	2030	2050	2100
HADCM3	-9.2	-18.5	-51.3
GFDLR30	-14.5	-7.8	8.7
ECHAM4	8.4	7.1	11.4

Tabla B. 1 Cambios proyectados en temperatura y precipitación para Costa Rica (A2)

Modelos	Cambios en temperatura °C		
	2030	2050	2100
HADCM3	2.7	3.6	3.8
GFDLR30	0.9	1.6	3.7
ECHAM4	0.7	1.6	4.2
Modelos	Cambios en precipitación (%)		
	2030	2050	2100
HADCM3	-22.5	-33.2	-55.9
GFDLR30	12.1	-2.1	-16.2
ECHAM4	2.0	-2.1	-7.5

2.5 Sistemas de Información Geográfica (SIG) Aplicados al Recurso Hídrico

El manejo del recurso hídrico requiere un amplio rango de datos espaciales, como relieve, clima, suelos, y uso del suelo (Wilson *et al.* 2000), de modo que los sistemas de información geográfica (SIG) y la modelación hidrológica son aplicados para conocer los avances y el manejo de los recursos hídricos, y su contribución es importante para la gestión y la toma de decisiones (Wilson *et al.* 2000; Jayakrishnan *et al.* 2005).

No obstante, los modelos de elevación digital (DEMs) han tenido grandes impactos de aplicaciones de SIG en el estudio del recurso hídrico. Actualmente las nuevas tecnologías como LIDAR (light detection and ranging) y GPS (global positioning system) ayudan a obtener una cartografía con mayor detalle y precisión, que permite

un mejor análisis y predicción del comportamiento hidrológico y la contaminación en una cuenca hidrográfica (Wilson *et al.* 2000).

Hoy en día, la evolución de la informática ha revolucionado el estudio de los sistemas hidrológicos y la gestión de los recursos hídricos a escalas de cuenca (Jayakrishnan *et al.* 2005), de modo que la evaluación de los recursos hídricos y la gestión son actividades que requieren el manejo múltiples formas de datos espaciales.

Los SIG y modelos de simulación han contribuido a la identificación y evaluación de posibles soluciones al agua en las últimas décadas. Las tecnologías de información geográfica han jugado un papel importante en el desarrollo modelos hidrológicos. Estos modelos ofrecen la oportunidad para mejorar nuestra comprensión de los procesos espaciales y los patrones de afectan a la distribución y movimiento del agua en los paisajes así como el impacto del uso del suelo sobre el recurso hídrico a largo plazo (Wilson *et al.* 2000).

2.6 Modelos de cambio de uso del suelo

En las últimas dos décadas se han incrementado las investigaciones relacionadas con el análisis y modelamiento del cambio en el uso del suelo, principalmente en países tropicales, muchos de estos modelos están ligados a estudios del ciclo global del carbono o impulsados por la búsqueda de las causas y consecuencias del cambio climático, pérdida de biodiversidad o modelamiento del paisaje. En general, los esfuerzos de analizar y modelar los procesos de cambio de uso del suelo se orientan a responder las siguientes interrogantes: ¿Por qué ocurre el cambio en el uso del suelo? ¿Dónde? y ¿Cuándo ocurre el cambio? Estas tres interrogantes fundamentales son abordadas a través de metodologías apoyadas en el uso de sensores remotos y análisis estadístico espacial (Lambin et al. 2001).

Los CUS pueden modelarse empíricamente mediante un análisis de los cambios pasados para desarrollar un modelo matemático que estima la probabilidad de cambio en función de un conjunto de variables explicativas. En general, el análisis espacial de los cambios se lleva a cabo a través de la comparación de dos mapas de cobertura/uso del suelo de dos fechas anteriores. Esta comparación permite estimar los patrones y procesos de cambio (tipos de transiciones y tasas de cambio) y calibrar el modelo. El análisis de los cambios pasados en relación con las variables explicativas permite mapear la probabilidad de las diferentes transiciones (Paegelow et ál 2003).

Los modelos de proyección cartográfica del cambio en el uso del suelo son herramientas relativamente fiables, dada por la potencia y exactitud espacial que le otorga el uso de bases de datos geográficos integrados a un Sistema de Información Geográfico (Schaldach, R y Priess, J. 2008). Una variedad de modelos de simulación se han desarrollado durante los últimos años para proyectar el cambio de uso del suelo

(Lambin et al. 2006), este es el caso de modelos que usan información geográfica, diseñados para el nivel de escala regional y de cuencas como LAND CHANGE MODELER, GEOMOD, CLUE, IMAGE, LANDSHIFT, PLM, SITE, SYPRIA, CA_MARKOV, ACCUS, RUSLE, entre otros, que se encuentran dentro de software especializado (SIG) para la ejecución de estos modelos, como por ejemplo IDRISI, DINAMICA EGO, GRASS, etc., todos estos modelos han sido aplicados en innumerables estudios a nivel local, regional y global (Mas, J. y Sandoval, F. 2011).

2.6.1 CA_MARKOV (Cellular Automata Markov)

El modelo Celular Automata Markov (CA-Markov), presente en el programa IDRISI SELVA, integra la modelización realizada por las cadenas de Markov a partir de la serie cronológica de usos del suelo, y los mapas de capacidad de acogida para cada uno de esos usos obtenidos según las variables de la base de datos (evaluación multicriterio), para asignar finalmente a cada píxel una categoría de ocupación del suelo (evaluación multiobjetivo) en la fecha proyectada. De esta manera, la modelización, al considerar las variables explicativas de índole natural o humana, mejora los resultados de aquella obtenida tan sólo mediante la aplicación de las cadenas de Markov (Eastman 2012).

Es un modelo dinámico empleado para simular la evolución o la dinámica de una amplia variedad de sistemas naturales y humanos; aplica un algoritmo de automatismo celular (con filtro medio booleano 5x5), que mide la contigüidad local. El resultado es multiplicado por los mapas obtenidos en la fase de evaluación multicriterio, incrementando por ello la probabilidad de pertenecer a una categoría por vecindad. Es decir, se obtiene un resultado que integra el carácter espacial o la probabilidad condicionada también por el entorno local, además su operatividad, simplicidad y capacidad para representar reglas matemáticas y lógicas, lo hace una herramienta muy exitosa (Ozah *et al.* 2012).

2.7 Modelo hidrológico

2.7.1 Modelo hidrológico SWAT

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua, por sus siglas en inglés, desarrollado por USDA-ARS es una consecuencia directa del modelo SWRRB (Simulador de Recursos Hídricos en Cuencas Rurales) (Williams et al.1985; Arnold et al.1990), que fue diseñado para simular los efectos de la gestión del agua y el movimiento de sedimentos en cuencas rurales. SWAT es un modelo hidrológico de base física y distribuida desarrollado para predecir los efectos de los cambios en el paisaje, las prácticas de gestión en materia de agua, sedimentos, y los rendimientos químicos agrícolas en una cuenca hidrográfica (Arnold et al., 1998). SWAT contiene

varios componentes hidrológicos que se han desarrollado y validado en escalas más pequeñas dentro de la EPIC (Williams et al.1984), GLEAMS (Leonard et al.1987) el modelo SWRRB.

SWAT está definido por 8 componentes: hidrología, clima, erosión y sedimentación, temperatura del suelo, crecimiento de plantas, nutrientes, pesticidas y manejo del suelo (Miller *et al.* 2007). El presente estudio se enfoca en los componentes de hidrología y el clima. El ciclo hidrológico que simula SWAT se basa en la ecuación de contenido final de agua en el suelo.

$$SW_t = SW_0 + \sum_i^t (R - Q_s - ET - w - Q_g)$$

Donde SW_t es el contenido final de agua en el suelo (mm) en el tiempo t , SW_0 es el contenido inicial de agua en el suelo en el día i (mm), t es tiempo (días), R es la precipitación diaria (mm), Q_s es la cantidad de escorrentía superficial en un día i (mm), ET es la cantidad evapotranspiración en día i (mm), w es la infiltración del agua a la zona no saturada del perfil del suelo en un día i (mm), y Q_g es la cantidad de flujo de retorno en un día i (mm) (Neitsch et al. 2005b; Miller et al. 2007).

La simulación de la escorrentía en base diaria se obtiene mediante la técnica de número de curva (USDA-SCS1972) y en cada hora por la ecuación de infiltración de Green-Ampt (Green y Ampt1911). El modelo ofrece tres opciones para estimar el potencial de EvapoTranspiración (ET): Hargreaves (Hargreaves y Samani 1985), Priestley-Taylor (Priestley y Taylor1972) Y Penman-Monteith (Monteith1965) (Arnold y Fohrer2005). El componente hidrológico de la escorrentía superficial utiliza la fórmula de Manning para determinar el tiempo de concentración de las cuencas hidrográficas y considerando tanto por tierra como por el canal de flujo.

SWAT ha sido utilizado por investigadores de todo el mundo para diversas aplicaciones en pequeñas y grandes cuencas (Srinivasan y Arnold1994; Spruill et al.2000; Chanasyk et al.2003, Chu y Shirmohammadi2004; Narasimhan y col.2005; Wu y Johnston2007; Schuol et al.2008; Du et al.2009; Rossi et al.2009). Las ventajas del modelo SWAT son: cuencas no aforadas se puede modelar, predicción sobre el impacto relativo de los datos de entrada alternativos (por ejemplo, cambios en las prácticas de gestión, el clima, la vegetación, etc) sobre la calidad del agua y otras variables de interés se puede cuantificar.

La calibración y validación del modelo es un factor clave para reducir la incertidumbre y el aumento en la capacidad de predicción, convirtiéndole en un modelo más eficaz para análisis de información (White y Chaubey 2005). Por lo tanto, la calibración hidrológica es el primer paso en la comprensión del complejo proceso

hidrogeológica de la cuenca, su análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo ayuda a comprender el comportamiento de la respuesta de la cuenca y sus interacciones (Jha 2011).

2.7.2 Calibración del modelo SWAT

Beven y Binley, 1992, consideran que es difícil calibrar manualmente un modelo distribuido en el que hay numerosos parámetros que influyen en una respuesta hidrológica simulada. El algoritmo SUFI-2 (The Sequential Uncertainty Fitting ver. 2), que se encuentra dentro del programa SWAT-CUP (SWAT – Calibration Uncertainty Procedures), se utilizó para asistir el análisis de calibración del modelo SWAT (Abbaspour et al., 2004, 2007). En comparación con las técnicas similares, tales como la estimación de la Probabilidad de Incertidumbre Generalizada (GLUE) (Beven y Binley, 1992), Solución de parámetros (ParaSol) (van Griensven y Meixner, 2006), y los métodos de inferencia bayesiana (Kuczera y Parent, 1998), SUFI-2 requiere un menor número de simulaciones para lograr el mismo nivel de rendimiento (Yang et al., 2008).

Los modelos hidrológicos no pueden evitar incertidumbres originadas a partir de datos de entrada, parámetros y la estructura de los modelos (Abbaspour et al, 2007). El objetivo de SUFI-2 es incluir la mayor parte de los datos medidos con las posibles bandas de incertidumbre más pequeñas. El proceso de calibración para ajustar los valores de los parámetros incluye varios pasos: (1) definir la función objetivo, (2) definir el rango inicial de los parámetros, (3) realizar el análisis de sensibilidad (opcional, pero muy recomendable); (4) emplear el método Latin Hypercube (Abbaspour et al, 2007) de los parámetros, el número común de combinaciones de parámetros es $N = 500-1000$, (5) ejecutar las simulaciones N veces y guardar las variables de salida simuladas, (6) el cálculo de la función objetivo, (7) calcular las métricas a finales de incertidumbre y (8) ajustar el rango de los parámetros y repetir desde el paso " 1", de esta manera, se obtiene el rango óptimo de los parámetros para la simulación posterior.

SUFI - 2 comienza asumiendo una gran incertidumbre de los parámetros (dentro de una gama físicamente significativa), de modo que los datos medidos inicialmente se están en el 95PPU, luego disminuye esta incertidumbre en los siguientes pasos controlando el factor P y el factor R (d). Los intervalos de los parámetros se actualizan mediante el cálculo de la matriz de sensibilidad (Jacobiana) y equivalente de una matriz de Hesse, seguido por el cálculo de la matriz de covarianza, el 95 % de los intervalos de confianza de los parámetros, y la matriz de correlación. Los parámetros se actualizan a continuación de tal forma que los nuevos rangos son siempre más pequeños que los rangos anteriores, y se centran en la mejor simulación (para más detalles, véase Abbaspour et al., 2007).

La bondad de ajuste y el grado en el modelo es calibrado para la incertidumbres

son evaluados por las dos anteriores medidas. Una situación ideal sería llevar al factor P alrededor de 100 % y un factor R cercano a cero. Cuando los valores aceptables de factor R (d) y factor P se alcanzan, las incertidumbres de los parámetros tienen los rangos deseados. Además, la bondad de ajuste se puede cuantificar por el R2 y / o de Nash-Sutcliff (NSE) entre las observaciones y los mejores simulaciones finales. NSE es una estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual en comparación con la varianza de los datos medidos (Nash y Sutcliffe 1970). Se indica la relación 1:1 entre la línea de ajuste de los datos observados y simulados y se calcula como:

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_i^n (Q_{obs_i} - Q_{sim_i})^2}{\sum_i^n (Q_{obs_i} - Q_{mean})^2} \right]$$

Donde n es el número total de observaciones, Qsimi y Qobsi son las descargas simuladas y observadas en la i-ésima observación, respectivamente, y Qmean es la media de los datos observados en el período de simulación. Los valores del NSE oscilan entre -∞ a 1, donde 1 representa el valor óptimo (ASCE 1993; Gupta et al. 1999 y Moriasi et al. 2007).

2.8 Resultados y conclusiones relevantes

La dinámica de cambio de uso del suelo en la cuenca en los periodos 1998 – 2011 y 2011 – 2030 muestra una predominancia de la cobertura de Bosques Densos (ubicados en la parte media y alta de la cuenca) a través del tiempo. En la parte baja de la cuenca, donde se encuentra predominantemente la zona de cultivos, se espera un aumento de las zonas cubiertas por pastos, zonas de regeneración y los cultivos de caña de azúcar y una reducción en las áreas cubiertas por cafetales.

Al comparar globalmente el comportamiento de los dos escenarios (A2 y A1B) podemos decir que para el escenario A2 esperamos una disminución drástica de las precipitaciones promedio en la cuenca (periodo 2012 – 2030) con un aumento paulatino de la temperatura, mientras que para el escenario A1B se espera un aumento gradual en las precipitaciones promedio y un aumento gradual de la temperatura (menor que el escenario A2) en la cuenca para el periodo 2012 – 2030, sin embargo en los dos escenarios se espera una reducción en el promedio de las precipitaciones en el año 2030 con relación al promedio del año 2011.

Usando proyecciones del modelo climático HadCM3 (escenarios A2 y A1B) para impulsar las simulaciones hidrológicas distribuidas, los resultados sugieren la posibilidad de cambios dramáticos en los caudales de la cuenca del río Pejibaye para el año 2030. En particular se espera un caudal de 24.7m^3 en la cuenca para el año 2030, bajo un escenario A1B, lo que representa una reducción del 25.3% en relación al año 2011. Bajo un escenario A2, se espera un caudal de 16.6m^3 en la cuenca para el año 2030, lo que representa una reducción del 49.7% en relación al año 2011.

Los parámetros hidrológicos analizados en este estudio se muestran afectados principalmente por la incidencia del cambio climático que por el cambio en el uso del suelo en la cuenca.

2.9 Literatura citada

- Aaviksoo, K. 1993. Changes of plant cover and land use types (1950's to 1980's) in three mire reserves and their neighbourhood in Estonia. *Landscape Ecology* 8(4):287-301.
- Abbaspour, K.C. et al., 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre- alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *J. Hydrol.* 333 (2–4), 413–430.
- Aguilar, E; Peterson, T; Ramirez, O; Frutos, R; Retana, J; Solera, M. 2005. Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961–2003. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110.
- Arnold, J; Williams, J; Nicks A; Sammons, N. 1990. SWRRB: A basin scale simulation model for soil and water resources management. A&M University Press, College Station, p 255.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J.R., 1998. Large área hydrologic modeling and assessment – Part 1: Model development. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 34 (1), 73–89.
- Arnold, J.G; Fohrer, N. 2005. SWAT 2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. *Hydrol Process.* 19 (3), 563–572.
- ASCE. 1993. Criteria for evaluation of watershed models. *J Irrig Drainage Eng* 119(3):429–442.
- Beven, K; Binley, A. 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrol Process.* 6 (3), 279–298.
- Bonini, J; Guzmán, E. 2003. Estimación de caudales y sedimentos en la cuenca del río Chaguana, mediante el modelo matemático AVSWAT (Soil and Water Assessment Tools). Guayaquil, EC. 43 p.
- Brown, DG; Pijanowski, B; Duh, J. 2000. Modeling the relationships between land use and land cover on private lands in the Upper Midwest, USA. *Journal of Environmental Management* 59(4):247-263.
- Candela, L; Igel, Wv; Javier Elorza, F; Aronica, G. 2009. Impact assessment of combined climate and management scenarios on groundwater resources and associated wetland (Majorca, Spain). *Journal of Hydrology (Amsterdam)* 376(3/4):510-527.
- CEPAL, (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2011. La economía del cambio climático en Centroamérica: Reporte técnico 2011. 419 p.
- Cervantes, R; Faustino, J; Jiménez, F; Benegas, L. 2009. Principios y criterios para la cogestión de cuencas hidrográficas en América Tropical. *Recursos naturales y ambiente* 56(57):59-65.
- Chanasyk, DS; Mapfumo, E; Willms, W. 2003. Quantification and simulation of surface runoff from fescue grassland watersheds. *Agr Water Manag* 59(2):137–153.
- Chereque, W. (1996). Hidrología para estudiantes de ingeniería civil. Lima, CONCYTEC.
- Chu, TW; Shirmohammadi, A. 2004. Evaluation of the SWAT model's hydrology component in the piedmont physiographic region of Maryland. *Trans ASAE* 47(4):1057–1073.
- Díaz, C., m. Esteller, et al. (2005). Recursos hídricos: Conceptos básicos y estudios de caso en iberoamérica. Uruguay, Piriguazú Ediciones - CIRA - UAEM.
- Du, B; Ji, X; Harmel, RD; Hauck, LM. 2009. Evaluation of a watershed model for estimating daily flow using limited flow measurements. *J Am Water Resour Assoc* 45(2):475–484.
- Eastman, JR. 2012. Guía para SIG y procesamiento de imágenes. Clark University 17: 321 p.

- Faustino, J. 2012. Identificación, evaluación y manejo de zonas de recarga hídrica. Managua, NI. 114 p.
- Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H., Arnold, J.G., 2007. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. Center for Agricultural and Rural Development. Iowa State University. Working Paper 07-WP 443.
- González, M; Di Prieto, L; González, M; Argerich, M; Castillo, N. s.f. Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático para la gestión y planificación local. 55 p.
- Green, WH; Ampt, GA. 1911. Studies on soil physics: Part 1. The flow of air and water through soils. J Agr Sci 4:11–24.
- Guo, H; Hu, Q; Jiang, T. 2008. Annual and seasonal streamflow responses to climate and land-cover changes in the Poyang Lake basin, China. Journal of Hydrology (Amsterdam) 355(1/4):106-122.
- Gupta HV, Sorooshian S, Yapo PO.1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: comparison with multilevel expert calibration. J Hydrologic Eng 4(2):135–143.
- Hargreaves GH, Samani ZA (1985) Reference crop evapotranspiration from temperature. Appl Eng Agric 1 (2):96–99.
- ICE. 2009. La importancia del manejo de la cuenca el Río reventazón. Unidad de Manejo de Cuencas. Biblioteca ICE. CR. (En línea). Consultado el 30 de Enero de 2013. Disponible en http://www.grupoice.com/esp/ele/manejo_cuencas/biblio/folletos/importan.html
- IPCC, (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2002. Cambio climático y biodiversidad. 85p.
- IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático). 2007a. Cambio Climático. Base de las ciencias físicas. Resumen para responsables de políticas. Resumen Técnico. Preguntas frecuentes. Contribución del Grupo de Trabajo 1 al Cuarto Informe de Evaluación. OMM-UNEP. 153 p.
- IPCC.2007b. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth. 345 p.
- Jayakrishnan, R; Srinivasan, R; Santhi, C; Arnold, J. 2005. Advances in the application of the SWAT model for water resources management. Hydrological Processes 19(3):749-762.
- Jha, MK. 2011. Evaluating hydrologic response of an agricultural watershed for watershed analysis. Water 3(2):604-617.
- Jiménez, B; Galizia, J. s.f. Diagnóstico del Agua en las Américas (en línea). Distrito Federal, MX 445 p. Consultado 15 Oct. 2013. Disponible en http://www.ianas.org/water/book/costa_rica.pdf
- Juckem, PF; Hunt, RJ; Anderson, MP; Robertson, DM. 2008. Effects of climate and land management change on streamflow in the driftless area of Wisconsin. Journal of Hydrology (Amsterdam) 355(1/4):123-130.
- Kamusoko, C; Oono, K; Nakazawa, A; Wada, Y; Nakada, R; Hosokawa, T; Tomimura, S; Furuya, T; Iwata, A; Moriike, H. 2011. Spatial Simulation Modelling of Future Forest Cover Change Scenarios in Luangprabang Province, Lao PDR. Forests 2(3):707-729.
- Kuczera, G., Parent, E., 1998. Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm. J. Hydrol. 211 (1–4), 69–85.

- Kusre, B.C., Baruah, D.C., Bordoloi, P.K., Patra, S.C., 2010. Assessment of hydropower potential using GIS and hydrological modeling technique in Kopili River basin in Assam (India). *Appl. Energy* 87, 298 - 309.
- Lambin, E; Turner, B; Geista, H; Agbolac, B; Angelsen, A; Bruce, J; Coomes, O; Dirzog, R; Fischer, G; Folke, C; George, G; Homewood, K; Imbernon, J; Leemans, R; Lin, X; Morano, E; Mortimore, M; Ramakrishnan, P; Richards, J; Steffens, W; Stone, G; Svedin, U; Veldkamp, T; Vogel, C; Xuy, J. 2001. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. 261- 269 p.
- Lambin, E; Geist, H. 2006. *Land-Use and Land-Cover Change: Local Processes, Global Impacts*, Global Change - The IGBP Series, Berlin. 44 p.
- Lavell, A. 2011. *Desempacando la adaptación al cambio climático y la gestión del riesgo: Buscando las relaciones y diferencias: Una crítica y construcción conceptual y epistemológica*. UICN - FLACSO. 45 p.
- Lenhart, T; Eckhardt, K; Fohrer, N; Frede, HG. 2002. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. *Phys Chem Earth* 27:645–654.
- Li, Z; Liu, W; Zhang, X; Zheng, F. 2009. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology (Amsterdam)* 377(1/2):35-42.
- Mango, L; Melesse, A; McClain, M; Gann, D; Setegn, S. 2011. Land use and climate change impacts on the hydrology of the upper Mara River Basin, Kenya: results of a modeling study to support better resource management. *Hydrol. Earth Syst. Sci* 15:2245-2258.
- Mas, J; Sandoval, F. 2011. Modelación de los cambios de coberturas/uso del suelo en una región tropical de México. *GeoTropico*, 5 (1), Artículo 1: pp. 1-24.
- Mattos, S; Gutierrez, L; Parodi, G; Damiano, F. 2010. *Análisis De Amenaza Por Inundación En Área Urbana Empleando Modelos Hidrodinámicos Y Herramientas Sig*. Buenos Aires, Argentina. 45 p.
- Miller, SN; Semmens, DJ; Goodrich, DC; Hernandez, M; Miller, RC; Kepner, WG; Guertin, DP. 2007. The automated geospatial watershed assessment tool. *Environmental Modelling & Software* 22(3):365-377.
- Monteith, JL. 1965. Evaporation and the environment. In: *The state and movement of water in living organisms*, XIXth Symposium of the Society for Experimental Biology. Cambridge University Press. pp 205–234.
- Mora, S. and R. Valverde (2005). *Geología: Procesos de la dinámica interna y externa*. Cartago, Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Moriasi, DN; Arnold, JG; Van Liew, MW; Binger, RL; Harmel, RD; Veith, T. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans ASABE* 50(3):885–900.
- Narasimhan, B; Srinivasan, R; Arnold, JG; Di Luzio, M. 2005. Estimation of long-term soil moisture using a distributed parameter hydrologic model and verification using remotely sensed data. *Trans ASAE* 48 (3):1101–1113.
- Nash, JE; Sutcliffe, JV. 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles. *J Hydrol* 10(3):282–290

- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R., Williams, J.R., 2005a. Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation. Verison 2005. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Sataion, Temple, Texas.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., 2005b. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Verison 2005. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Sataion, Temple, Texas.
- Notter, B; MacMillan, L; Viviroli, D; Weingartner, R; Liniger, HP. 2007. Impacts of environmental change on water resources in the Mt. Kenya region. *Journal of Hydrology (Amsterdam)* 343(3/4):266-278.
- ONU-AGUA. 2010. Climate change adaptation: The pivotal role of water (en línea). UN-WATER. p. 16 p. Consultado 1 sep. 2013. Disponible en <http://www.unwater.org/documents.html>
- Ozah, AP; Dami, A; Adesina, FA. 2012. A Deterministic Cellular Automata Model for Simulating Rural Land Use Dynamics: A Case Study of Lake Chad Basin. *Journal of Earth Science and Engineering* 2(1):22-34.
- Paegelow, M; Camacho, M; Menor, J. 2003. Cadenas de Markov, evaluación multicriterio y evaluación multiobjetivo para la modelización prospectiva del paisaje. *Geofocus* 3:22-44.
- Priestley CHB, Taylor RJ (1972) On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon Weather Rev* 100:81–92.
- Proaño, M; Gavilanes, M; Valenzuela, P; Cisneros, C. 2006. Aplicación Del Modelo Swat En La Subcuenca Del Río Ambato: Proyecto Cuencas Andinas – CODESAN - GTZ. Quito, Ecuador. 44 p.
- Prochnow, S.J., White, J.D., Scott, T., Filstrup, C.D., 2008. Multi-scenario simulation analysis in prioritizing management options for an impacted watershed system. *Ecohydrology Hydrobiology* 8, 3e15.
- Rossi, CG; Srinivasan, R; Jirayoot, K; Le Due, T. 2009. Hydrologic evaluation of the lower Mekong River basin with the Soil and Water Assessment Tool model. *Int Agric Eng J* 18(1–2):1–13.
- Ruiz Benito, P; Cuevas, JA; Bravo de la Parra, R; Garcia del Barrio, JM; Zavala, MA. 2010. Land use change in a Mediterranean metropolitan region and its periphery: assessment of conservation policies through CORINE Land Cover data and Markov models. *Forest Systems* 19(3):315-328.
- Schaldach, R & Priess, J. 2008. *Integrated Models of the Land System: A Review of Modelling Approaches on the Regional to Global Scale*. ISSN. 34 p.
- Schilling, KE; Jha, MK; Zhang, YK; Gassman, PW; Wolter, CF. 2008. Impact of land use and land cover change on the water balance of a large agricultural watershed: historical effects and future directions. *Water. Resour. Res.* 44, 1e12.
- Schilling, K; Wolter, C. 2009. Modeling nitrate-nitrogen load reduction strategies for the Des Moines River, Iowa using SWAT. *J. Environ. Manage.* 44, 671e682.
- Schuol, J; Abbaspour, KC; Srinivasan, R; Yang, H. 2008. Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model. *J Hydrol* 352(1–2):30–49.

- Shen, Z; Gong, Y; Li, Y; Hong, Q; Xu, L; Liu, R. 2009. A comparison of WEPP and SWAT for modeling soil erosion of the Zhangjiachong watershed in the three Gorges reservoir area. *Ag Water Mgmt* 96, 1435e1442.
- Solis, H; Oreamundo, R; Murrillo, W; Chacon, J. 1993. Modelación hidrológica e hidráulica para el control de inundaciones en centroamérica. CATIE, Costa Rica.
- Soares-Filho, B; Alencar, A; Nepstad, D; Cerqueira, G; Diaz, V; del Carmen, M; Rivero, S; Solórzano, L; Voll, E. 2004. Simulating the response of land-cover changes to road paving and governance along a major Amazon highway: the Santarém–Cuiabá corridor. *Global Change Biology* 10(5):745-764.
- Spruill, CA; Workman, SR; Taraba, JL. 2000. Simulation of daily and monthly stream discharge from small watersheds using the SWAT model. *Trans ASAE* 43(6):1431–1439.
- Srinivasan, R; Arnold, JG. 1994. Integration of a basin-scale water quality model with GIS. *Water Resour Bull Am Water Resour Assoc* 30(3):453–46.
- Stone, M; Hotchkiss, R; Hubbard, C; Fontaine, T; Mearns, L; Arnold, J. 2001. Impacts of climate change on Missouri River basin water yield. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 37, 1119e1129.
- Teixeira, AMG; Soares-Filho, BS; Freitas, SR; Metzger, JP. 2009. Modeling landscape dynamics in an Atlantic Rainforest region: implications for conservation. *Forest Ecology and Management* 257(4):1219-1230.
- Tobón, C., M. Barrionuevo, et al. (2009). Los bosques andinos y el agua. Quito, ECOBONA.
- Turner, BL; Meyer, WB. 1991. Land use and land cover in global environmental change: Considerations for study. *International Social Science Journal* 43(4):669-79.
- Van Griensven, A., Meixner, T., 2006. Methods to quantify and identify the sources of uncertainty for river basin water quality models. *Water Sci. Technol.* 53 (1), 51–59.
- Villón, M. (2004). Hidrología. Cartago, Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Weng, Q. 2002. Land use change analysis in the Zhujiang Delta of China using satellite remote sensing, GIS and stochastic modelling. *Journal of Environmental Management* 64(3):273-284.
- White, KL; Chaubey, I. 2005. Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable SWAT model. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 41(5):1077-1089.
- Williams, JR; Jones, CA; Dyke, PT. 1984. A modelling approach to determine the relationship between erosion and soil productivity. *Trans ASAE* 27(1):219–144.
- Williams, JR; Nicks, AD; Arnold, JG. 1985. Simulator for water resources in rural basins. *J Hydrol Engr* 111 (6):970–986.
- Wilson, JP; Mitasova, H; Wright, DJ. 2000. Water resource applications of geographic information systems. *Urisa Journal* 12(2):61-79.
- Wu, K; Johnston, CA. 2007. Hydrologic response to climatic variability in a Great Lakes Watershed: a case study with the SWAT model. *J Hydrol* 337:187–199.
- Yang, J., Reichert, P., Abbaspour, K.C., Xia, J., Yang, H., 2008. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. *J. Hydrol.* 358 (1–2), 1-23.

3. ARTICULO: ESTIMACIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y EL CAMBIO EN EL USO DEL SUELO EN EL CAUDAL DE LA CUENCA DEL RÍO PEJIBAYE – COSTA RICA, MEDIANTE EL MODELO HIDROLÓGICO SWAT.

RESUMEN

Zuleta, C. 2013. Estimación de los efectos del cambio climático y el cambio en el uso del suelo en el caudal de la cuenca del río Pejibaye – Costa Rica, mediante el modelo hidrológico SWAT. Tesis Mag. Sc. Turrialba, CR. CATIE. 41 p.

En el presente estudio se utilizó el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool) para la estimación del caudal al año 2030, ante los efectos del cambio climático y el cambio del uso del suelo en la cuenca del río Pejibaye en Costa Rica. Esta cuenca de 250 km², cubierta principalmente por bosque denso (80%), es de gran interés para el sector hidroeléctrico del país, ya que es uno de los principales aportantes del proyecto hidroeléctrico Angostura. El mapa de uso del suelo para el año 2030 fue estimado mediante el modelo CA_Markov utilizando los mapas de uso del suelo del año 1998 y 2011, generados a partir de fotos aéreas e imágenes satelitales respectivamente. El modelo SWAT fue calibrado en dos lugares (Parte Alta y Media – Baja de la cuenca), mediante SWAT-CUP, con datos mensuales observados de caudal para el periodo 1980 – 2011, obteniéndose una bondad de ajuste del modelo calificada como excelente (NSE: 0.8; R2: 0.82). Posteriormente, se llevaron a cabo las simulaciones con dos escenarios de emisiones (A2 y A1B) a partir del modelo de circulación global HadCM3 para el periodo 2012 – 2030 y con dos escenarios de uso del suelo (mapa 2011 y mapa 2030). Todas las combinaciones estimaron un descenso en los caudales para el año 2030 en relación al año 2011 (escenario BASE), las simulaciones con escenarios A2 muestran reducciones más drásticas (-49.7%) en el caudal en comparación a las simulaciones con escenarios A1B (-25.3%). Estas variaciones en el caudal están mayormente relacionadas con los cambios en la temperatura y la precipitación, que con los cambios en el uso del suelo en la cuenca. El alto grado en la incertidumbre de los modelos de circulación global debe tenerse en cuenta al evaluar los futuros impactos potenciales y la toma de decisiones sobre las acciones para la adaptación al cambio climático en la zona. Sin embargo, este es un buen punto de partida para la planificación y el manejo integrado de la cuenca.

Palabras clave: SWAT, SWAT-CUP, CA_MARKOV, Manejo Integrado de Cuencas, Cambio Climático, Cambio de Uso del Suelo, Calibración Multi-sitio, Modelación Hidrológica, Caudal, Pejibaye, Costa Rica.

ABSTRACT

In the present study used the SWAT model (Soil and Water Assessment Tool) for estimating flow in 2030, in front of the effects of climate change and land use change in Pejibaye River watershed in Costa Rica. This watershed, of 250 km², is mainly dense forest cover (80 %), is of great interest to the country's hydropower sector, being one of the main contributors to Angostura hydroelectric project. The land use map for the year 2030 was estimated by the CA_Markov model using the land use maps of 1998 and 2011, generated from aerial photographs and satellite images, respectively. The SWAT model was calibrated in two places (Highlands and Media - Bottom of the watershed) by SWAT-CUP, with observed monthly flow data for the period 1980-2011, with an efficiency of the adjusted model rated as excellent (NSE : 0.8 , R²: 0.82) . Subsequently, were performed simulations with two emission scenarios (A2 and A1B) from the HadCM3 global circulation model for the period 2012-2030 and with two scenarios of land use (Map 2011 and 2030). All combinations estimated a decrease in flow for the year 2030 compared to 2011 (BASE scenario), the A2 scenario simulations show drastic reductions (-49.7 %) in flow compared to simulations with A1B scenarios (-25.3 %). These variations in the flow are mostly related to changes in temperature and precipitation, with the changes in land use in the watershed. The high degree of uncertainty in global circulation models should be considered when evaluating potential future impacts and decisions on actions for climate change adaptation in the area. However, this is a good starting point for planning and integrated management of the watershed.

Keywords: SWAT, SWAT-CUP, CA_MARKOV, Integrated Watershed Management, Climate Change, Land Use, Multi-Site Calibration, Hydrologic Modeling, Flow, Pejibaye, Costa Rica.

3.1 Introducción

Dentro de la gestión integrada de cuencas hidrográficas, la estimación de los caudales es esencial para evaluar el rendimiento potencial del agua de una cuenca hidrográfica, para planificar las medidas de conservación de la misma, incluyendo la recarga de las zonas de agua subterránea y la reducción de la sedimentación y los riesgos de inundación aguas abajo (Lenhart et al. 2002). La cuenca del río Pejibaye forma parte del sistema hidrográfico del río Reventazón, tiene una gran importancia para Costa Rica, aun cuando es pequeña en área (250 km²), debido a que en materia de caudales (promedio anual: 34 m³/s) es una de las principales aportantes para el proyecto Hidroeléctrico Angostura, el cual, en combinación con el complejo hidroeléctrico Cachí – Río Macho producen el 32% de la hidroelectricidad nacional (ICE, 2009). Esto exige la modelación de la precipitación y los caudales por medio de un modelo hidrológico calibrado adecuadamente con el fin de proporcionar información sistemática y coherente sobre la disponibilidad futura de agua en la cuenca.

Los modelos hidrológicos permiten evidenciar de una manera más comprensible los problemas en la disponibilidad del recurso hídrico en una cuenca, proporcionando una serie de factores que deben considerarse para el manejo y gestión del recurso hídrico tanto en el presente como en el futuro. Actualmente existen diversos modelos hidrológicos, sin embargo, pocos son capaces de analizar diferentes medidas alternativas que permitan una adecuada gestión del agua en una cuenca y a su vez, que contribuyan a tomar decisiones para la planificación del recurso hídrico, mediante la simulación de escenarios climáticos y cambios en el uso del suelo (Notter et al. 2007).

Las predicciones de variación climática son relevantes para una buena planificación del recurso hídrico (Candela et al. 2009); sin embargo, el comportamiento futuro de los recursos hídricos en una cuenca debe ser estudiado en base a los efectos combinados de los cambios del clima y el cambio de uso del suelo (Juckem et al. 2008). Es por esto que, los estudios hidrológicos son un requisito primordial para la formulación y desarrollo de proyectos sostenibles, de tal manera que pueda comprenderse la posible variación del recurso hídrico ante la variabilidad climática, el incremento en la explotación del recurso hídrico, cambios en el uso del suelo, el crecimiento poblacional y económico, etc., además, deben evaluar los impactos que puedan generar las diferentes alternativas de manejo en la cuenca, asegurando así, un efectivo planteamiento de estrategias de adaptación al cambio climático y la gestión integrada del recurso hídrico.

En el presente estudio se utilizó el modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold y Fohrer 2005; White y Chaubey 2005; Neitsch et al., 2005a, b; Li et al. 2009; Vigerstol y Aukema, 2011), con el objetivo de estimar los efectos del cambio climático y los cambios en el uso del suelo en los caudales de la cuenca; de tal manera que esta información contribuya a la gestión integrada del recurso hídrico;

además, de la aplicación y calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca del río Pejibaye.

3.2 Materiales y métodos

3.2.1 Área de estudio

La cuenca del río Pejibaye (Figura 1) tiene un área aproximada de 250 km² y está ubicada en el cantón Jiménez en la provincia de Cartago, pertenece al sistema de la Cuenca Alta del Río Reventazón ubicada en la vertiente del caribe de Costa Rica. Con coordenadas geográficas 9° 38" y 9° 52" N y 83° 38" y 83° 48" O, presenta un rango altitudinal de va desde los 570 a los 2680 m.s.n.m. y presenta áreas con pendientes mayores a 60%. Aproximadamente el 80% de la cuenca se encuentra cubierta por bosque denso (Parque Nacional Tapanti principalmente) y entre los principales usos del suelo tenemos la caña de azúcar, pastos, café y charrales. La población estimada dentro de la cuenca es de 3245 habitantes (INEC 2011), donde el 73% está representado por población rural y el 27% por la población urbana (ICE 2005).

Según Holdridge la vegetación natural de la cuenca se encuentra localizada en tres zonas de vida, Bosque Muy Húmedo Premontano, Bosque Pluvial Premontano y Bosque Pluvial Montano Bajo (Mora 1987). Esta cuenca se caracteriza por tener un promedio anual de precipitación que oscila entre los 2800 y los 8000 mm. En la zona centrooeste de la cuenca la precipitación puede ser hasta de 9000 mm/año, lo que la convierte en una de las zonas más lluviosas de Costa Rica por lo que posee un gran potencial hidroeléctrico con un caudal promedio anual de 34m³/s, y es uno de los mayores aportantes para el Proyecto Hidroeléctrico Angostura del ICE (Jiménez et al. 2005).

Por esta razón, es de vital importancia conocer cuál sería el comportamiento del recurso hídrico en esta cuenca ante los efectos del cambio climático y el cambio del uso del suelo en los próximos años, ya que estos condicionarán la provisión de recursos hídricos para la generación hidroeléctrica, el consumo humano, el riego de los cultivos, etc. Es a partir de esta información que se debe tomar decisiones sobre el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales dentro de la cuenca del Río Pejibaye.

3.3 Procedimiento metodológico

3.3.1 Modelo hidrológico SWAT

SWAT es un modelo hidrológico de base física y distribuida, desarrollado para predecir los efectos de los cambios en el paisaje las prácticas de gestión en materia de agua, sedimentos, y los rendimientos químicos agrícolas en una cuenca hidrográfica (Arnold et al.,

1998). Además, SWAT es capaz de evaluar los impactos del cambio climático sobre las respuestas hidrológicas y las actividades agrícolas mediante el ajuste de las variables climáticas (Arnold y Fohrer, 2005; Neitsch et al., 2005a, b; Vigerstol y Aukema, 2011).

SWAT opera típicamente en un intervalo de tiempo diario para simulaciones a largo plazo en las cuencas. SWAT representa heterogeneidades espaciales dividiendo una cuenca en varias subcuencas, luego divide aún más las sub-cuencas en múltiples unidades de respuesta hidrológica (HRUs). Cada HRU es una combinación de suelo, cubierta vegetal y pendientes. La cantidad y calidad de agua simulada de cada subcuenca se enrutan y distribuyen al caudal de salida de la cuenca (Neitsch et al. 2005b).

Desafortunadamente, aún con el uso de datos climáticos medidos, el usuario del modelo puede esperar algún error, debido a la inexactitud en la toma de los datos hidrometeorológicos. La medida de estos datos en calibradores individuales es susceptible a error por varias causas (error humano, error de calibración de dispositivos de toma de datos), típicamente las estimaciones totales o medias de datos hidrometeorológicos y sedimentos de un área por períodos de un año o más producen ciertas inexactitudes relativas al 10% (Neitsch et al., 2005^a, b).

Una de las virtudes del modelo consiste en utilizar mucha información para realizar una mejor simulación, requiere datos de entrada relativamente fáciles de disponer y permite estudiar los impactos a largo plazo, sin embargo en los países poco desarrollados, no existe toda la información para utilizar el modelo correctamente (Mattos et al. 2010).

Entre las ventajas del modelo SWAT tenemos:

- Base física.
- Gran documentación de aplicaciones.
- Emplea datos de entrada relativamente fáciles de conseguir.
- Detalle con respecto a la base de datos de cultivos para la modelización del crecimiento de los mismos.
- Base de datos de las características de diferentes coberturas de uso de la tierra.
- Estudio a nivel de cuencas.

Las limitaciones de este modelo son:

- No realiza la simulación de eventos subsidiarios (p.ej. ocurrencia de una tormenta)
- Realiza la simulación del direccionamiento de pesticidas, uno por vez, a través de la red de corrientes.
- Los datos de simulación generados para cada URH no se visualizan automáticamente de manera espacial, ello se ha superado con el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica como ArcGis.

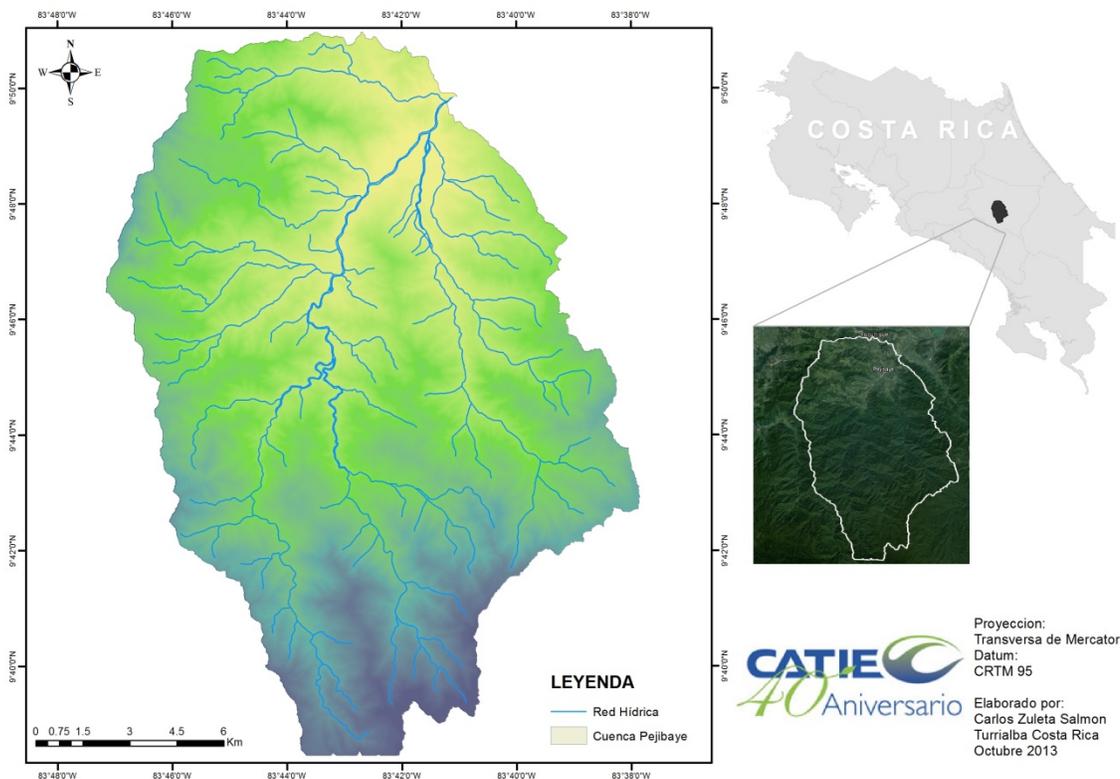


Figura 1. Ubicación del área de estudio

DATOS DE ENTRADA DEL MODELO SWAT

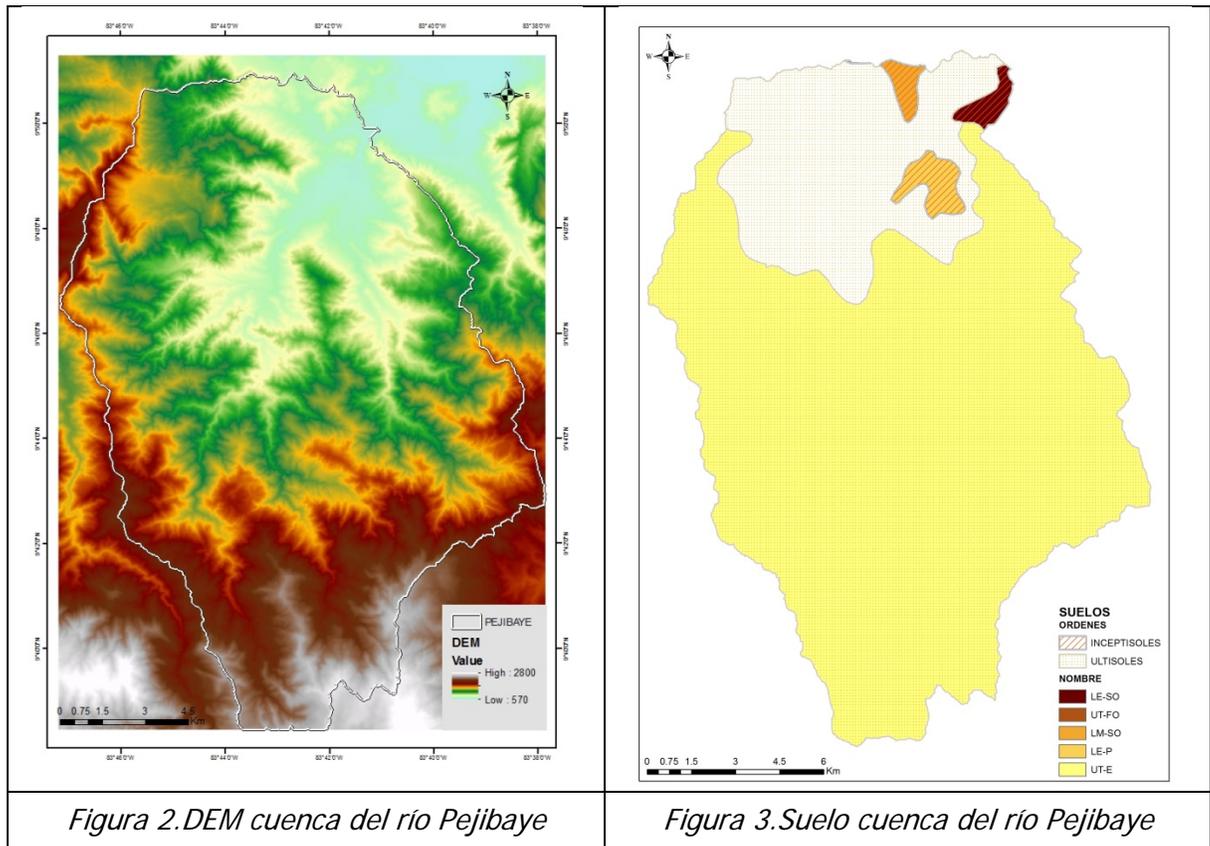
3.3.2 Modelo de elevación digital (DEM)

El Modelo de elevación digital (DEM) por sus siglas en inglés, es una de las principales entradas del modelo SWAT. El DEM es una matriz de muestreo de elevaciones (Z) que están espaciados a intervalos regulares en las direcciones X y Y. El DEM del área de estudio (Figura 2) se preparó a partir de una cobertura digital de curvas de nivel con intervalos de 10 metros a escala 1:25.000 generada por el proyecto TERRA en el año 1998.

3.3.3 Mapa de suelos

El Mapa de suelos de la cuenca del río Pejibaye (Figura 3) fue preparado en base al mapa de suelos de la cuenca del río Reventazón (PREVDA. 2008), disponible en la Oficina del Departamento de Estudios del ICE. El suelo juega un papel importante en el modelado de diferentes procesos hidrológicos como: escorrentía superficial, infiltración, percolación, flujo lateral sub-superficial, agua disponible para las plantas, etc. En el modelo SWAT, las diversas propiedades físicas del suelo como la textura del suelo, conductividad hidráulica, el contenido de carbono orgánico, densidad aparente, contenido de agua disponible, la profundidad del suelo, etc. deben ser analizados para la simulación, en el presente estudio

los parámetros hidrológicos como la conductividad hidráulica y el agua disponible, se calcularon a partir de la textura y densidad aparente usando el programa SPAW (Soil Water Characteristics Program), donde, la información mínima necesaria para cada clase de suelo es la textura y el porcentaje de materia orgánica. Los valores para los demás parámetros se han obtenido del informe de balance hídrico en las subcuencas de las partes alta y media del río Reventazón (ProDUS. 2011) y otra literatura disponible.



Los principales suelos que se encuentran en la zona de estudio, según PREVDA (2008), son Inceptisoles los cuales son suelos de desarrollo reciente, profundos, permeables, de colores oscuros a parduzcos con más de 12 kg de carbono orgánico por m² y los Ultisoles que son suelos profundos, arcillosos, moderadamente ácidos, de colores rojizos, muy susceptibles a la erosión con más de 12 kg de carbono orgánico por m².

3.3.4 Mapas de uso del suelo

El mapa de uso del suelo es un insumo fundamental para el modelo SWAT. Para cumplir con los objetivos de este estudio se elaboraron dos mapas de uso del suelo de la cuenca para años diferentes (1998 y 2011). El primer mapa de uso del suelo de la cuenca del río Pejibaye (Figura 4) se preparó mediante la fotointerpretación utilizando fotografías aéreas del Proyecto TERRA del año 1998 a escala 1:40.000. El segundo mapa de uso del

suelo de la cuenca del río Pejibaye (Figura 5) se preparó utilizando un mosaico de imágenes satelitales (RapidEye) del año 2011 con una resolución espacial de 5 metros, las mismas que fueron proporcionadas por la Universidad de Idaho al CATIE. Para la generación de estos dos mapas se utilizó la interpretación visual y se utilizó el software ArcGis (ESRI) versión 10.1 como plataforma para la digitalización de los mapas de uso del suelo a escala 1:10.000, posteriormente la información del mapa de uso del suelo del año 2011 fue validada *in situ* para corroborar y verificar los cambios aproximados al 2011. Siete clases de uso del suelo se identificaron para los dos mapas de uso del suelo (Tabla 1). La principal (y más dominante) categoría de uso del suelo para los dos mapas de la cuenca es el Bosque denso, y representa aproximadamente el 82.23% y el 82,33% de la superficie total de la cuenca, respectivamente.

Tabla 1. Categorías de uso de suelo en la cuenca del río Pejibaye años 1998 y 2011.

USO	DESCRIPCIÓN*	USO SWAT	% 1998	%2011
Bosque Denso	La vegetación cubre el área de manera regular, densa y con textura rugosa. La cobertura de copas tiene 85% o más.	FRST	82.23	82.3
Caña de Azúcar	Áreas con más del 85% de cañaverales como cobertura.	SUGC	4.84	5.37
Pastos	Áreas con más del 85% de gramíneas como cobertura herbácea.	PAST	2.23	4.08
Regeneración	Áreas con una densidad de cobertura arbórea o arbustiva entre el 5 y 40%. El estrato horizontal de vegetación corresponde a herbáceas-gramíneas.	RNGB	5.87	5.11
Ríos	Red Hídrica	APPL	0.28	0.28
Sistemas Forestales	Áreas mayores a 5 hectáreas, asociadas con café o frutales con o sin especies forestales como sombra.	COFF	4.41	2.42
Zona Urbana	Áreas pobladas con densidad media a baja.	URLD	0.14	0.41

*Categorías de clasificación de uso a criterio personal en base a FAO (2000) y Gallego (2002).

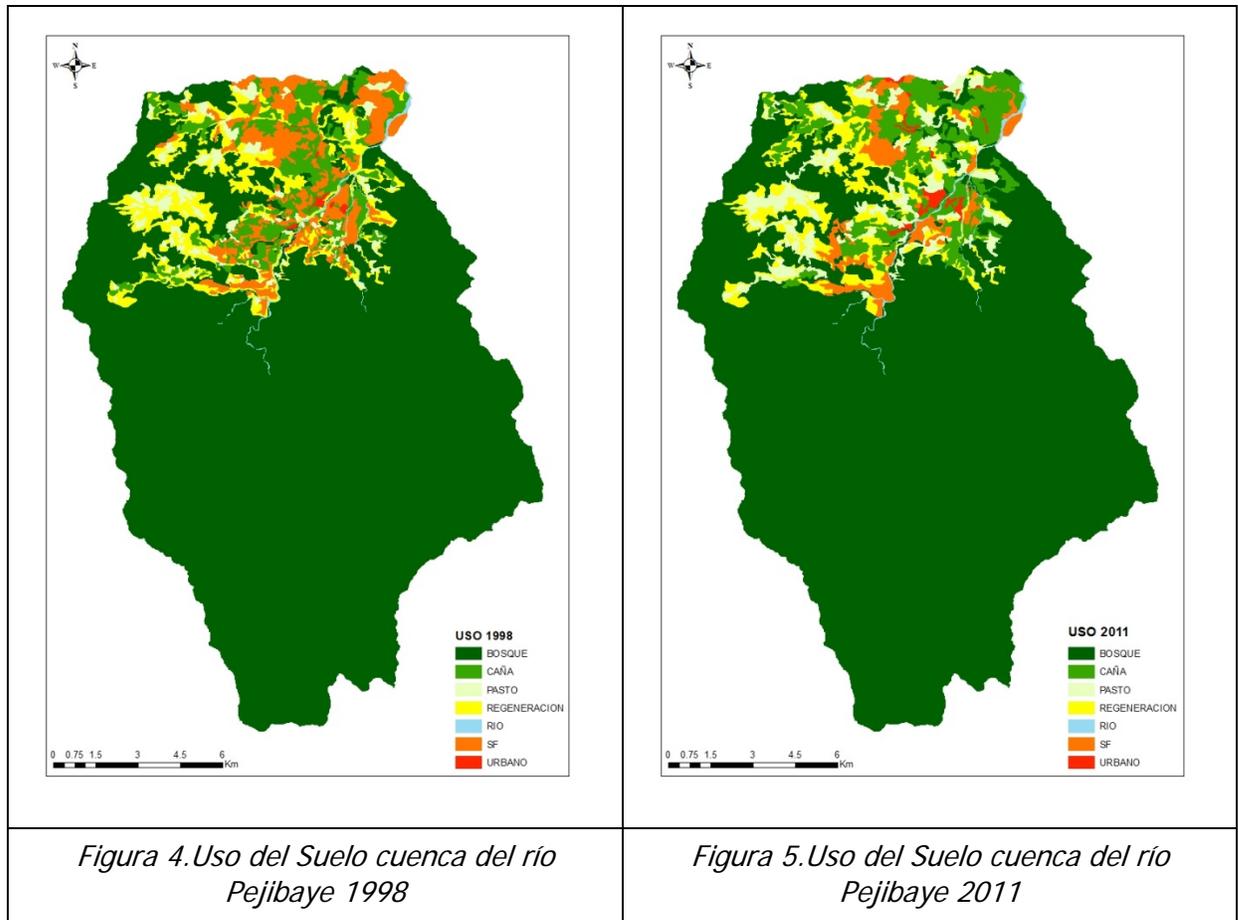
Según Neitsch et al. (2005^a), debido a que SWAT genera la red hídrica con base al DEM, los ríos no deben ser codificados como cuerpos de agua (WATR) en las coberturas de uso del suelo que utilizará el modelo para la simulación. Por esta razón, y tomando en consideración la amplia experiencia del CIAT en la modelación con SWAT, se clasificó a estas áreas como Bosques de Galería, los cuales existen en la cuenca en los dos lados del cauce (verificación en campo), asimismo, de acuerdo a las leyes de conservación

ambiental de Costa Rica, estos bosques de galería deben existir y ser conservados en ambas márgenes de los ríos del país, por lo que estas áreas no sufren cambios importantes (cobertura y estructura) originados por el hombre a través del tiempo (ICE, 2005).

En ese sentido, se clasificó a la cobertura de Red Hídrica de la cuenca (que representa el 0.28% del área de la cuenca) como Bosques de Galería y se la codificó para el modelo SWAT como APPL (Manzana). Según la experiencia y recomendaciones del CIAT se deben modificar los valores originales de APPL (dentro de la base de datos del modelo SWAT), en cuanto a las características fisiológicas de la planta, para que así, la cobertura tenga características similares a las de la cobertura que queremos tener dentro del modelo, en este caso el Bosque de Galería. Todo esto debido a que el modelo SWAT no posee una cobertura de uso del suelo, dentro de sus bases de datos, que sea similar a los Bosques de Galería de los trópicos.

Es así que, se utilizaron las características fisiológicas del *Prioria copaifera Griseb* (Árbol de Cativo) que es uno de los arboles más representativos de los bosques de galería de los trópicos y de Costa Rica principalmente. De acuerdo a esto se modificó, a la cobertura APPL, dentro de la base de datos de SWAT de la siguiente manera:

- Número de Curva - CN: 48, 68, 79, 83.
- Manning for overland flow – n: 0.07
- Índice de Área Foliar – IAF: 3.14
- Altura del dosel - CANOPY (m): 12
- Temperatura máxima óptima (°C): 26



3.3.5 Mapa de uso del suelo proyectado al 2030

A partir de los mapas de uso de suelo de 1998 y del 2011 y mediante el modelo CA_MARKOV (Idrisi Selva), descrito por Ozah et al. (2012) y Paegelow y Camacho Olmedo (2005), se generó la matriz de transición para las diferentes categorías de uso del suelo en la cuenca del río Pejibaye. Para esto se utilizó el componente de las cadenas de markov con el cual se obtuvo la matriz de transición de áreas y probabilidades (Benito et al. 2010; Eastman 2012). El modelo de cadenas de markov tiene la capacidad de proyectar las tendencias de cambio de uso (Fan et al. 2008).

La proyección de uso del suelo para el año 2030 en la cuenca, se realizó mediante el SIG Idrisi Selva, utilizando los componentes de las cadenas de markov y el celular automático (Modelo CA_MARKOV) (Fan et al. 2008; Ruiz Benito et al. 2010; Kamusoko et al. 2011), utilizando la matriz de transición de áreas y de probabilidades (Fan et al. 2008; Eastman 2012), las mismas que, pueden predecir los cambios futuros del sistema, determinando la dirección y la magnitud del cambio, así como la descripción cuantitativa, facilitando el análisis de los cambios (Tang et al. 2007; Ruiz Benito et al. 2010).

Respecto a la predicción de los cambios en los usos del suelo por parte del modelo CA_MARKOV (Idrisi Selva), se menciona que tiene una buena precisión con respecto a los cambios de origen natural con un error entre 1 a 10%, y con respecto a los cambios de origen antrópico se puede tener un error hasta del 30%, dentro de estos pueden estar asociados los errores de digitalización e interpretación (Tang et al. 2007).

Para la clasificación de los diferentes usos del suelo en la proyección al año 2030, se utilizaron las mismas clases que para los mapas de uso del suelo de los años 1998 y 2011, de este modo se evitan confusiones y transiciones de uso que no sean coherentes cuando se pretende hacer simulaciones futuras de cambios de uso del suelo (Ozah et al. 2012).

3.3.6 Datos climáticos

SWAT requiere de precipitación diaria, la temperatura máxima y mínima del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Los valores para todos estos parámetros pueden ser leídos de los registros de datos observados o pueden ser generados. En el presente estudio se utilizaron datos diarios de precipitación y temperatura máxima y mínima del aire de 4 estaciones meteorológicas ubicadas dentro de la cuenca del río Pejibaye (Tabla 2 y Tabla 3). Estos datos corresponden a un periodo de 32 años (1980 – 2011) de los registros del Instituto Costarricense de Electrificación (ICE). Debido a la limitación en cuanto a la información correspondiente a radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa de las 4 estaciones, se utilizó el generador de clima del modelo SWAT para simular estos valores (Neitsch et al., 2005a, b).

Además, se obtuvo de los registros de las estaciones hidrometeorológicas del ICE, información mensual de caudales pertenecientes a 2 estaciones (Tabla 2 y Tabla 3) dentro de la cuenca. Estos datos corresponden a un periodo de 32 años (1980 – 2011), con la cual se realizó el proceso de calibración del modelo de la cuenca del río Pejibaye para el periodo 1980 – 2011.

Tabla 2. Datos Hidrometeorológicos para la Cuenca del río Pejibaye.

ESTACIÓN	DATOS	AÑOS	PERIODO	FRECUENCIA
ORIENTE, HUMO, TAUS, DESTIERRO	Precipitación	32	1980 - 2011	Diaria
	Temperatura Max /Min	32	1980 - 2011	Diaria
ORIENTE, HUMO	Caudales	32	1980 - 2011	Mensual

Tabla 3. Estaciones Hidrometeorológicas usadas para el estudio de la Cuenca.

ESTACIÓN	LATITUD	LONGITUD	ELEV (m.s.n.m)
ORIENTE	9.82	-83.7	690
HUMO	9.78	-83.72	750
TAUS	9.73	-83.7	1360
DESTIERRO	9.7	-83.75	2022

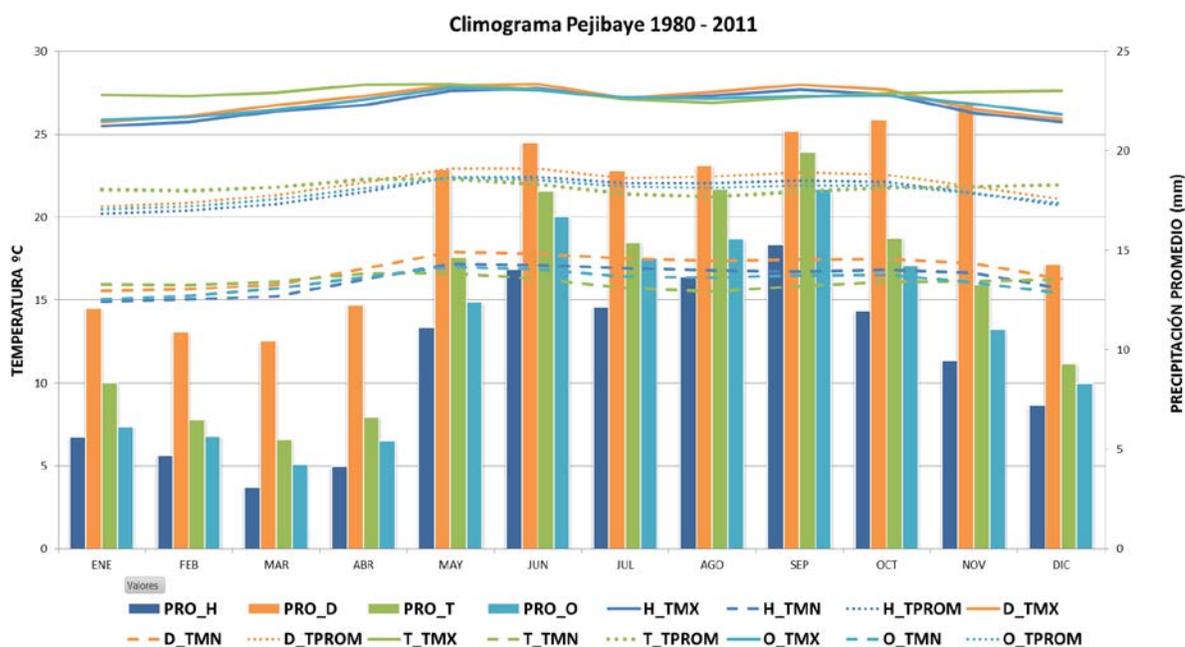


Figura 6. Climograma de la Cuenca del río Pejibaye (1980 - 2011) por estaciones.

H: Estación Humo; **D:** Estación Destierro; **T:** Estación Taus; **O:** Estación Oriente; **PRO:** Precipitación Promedio Mensual; **TMX:** Temperatura Máxima; **TMN:** Temperatura Mínima; **TPROM:** Temperatura Promedio.

Se muestra en la Figura 6 el climograma de la cuenca del río Pejibaye para el periodo 1980 – 2011, compuesto por los datos de precipitación (mm), temperatura máxima, mínima y promedio (°C) para las cuatro estaciones (Humo, Oriente, Taus, Destierro). Se muestran claramente los meses con más precipitación (Mayo – Noviembre) y los meses con menores registros de precipitación (Diciembre – Abril). Así mismo, se observa que la estación Destierro es la que ha recibido mayor cantidad de precipitación a durante todo el periodo. Se evidencia también que las temperaturas medias (durante este periodo) oscilan entre los 20 y 23°C.

En la Figura 7 se presenta el mismo patrón en lo que a caudales promedio observados se refiere (para las estaciones de aforo Oriente y Humo) para el periodo 1980 – 2011, se observa que los meses con mayores caudales (20 – 45 m³) van desde el mes de

Mayo al mes de Noviembre y desde el mes de Diciembre al mes de Abril se presentan los caudales más bajos ($10 - 20 \text{ m}^3$), concordando con los meses que presentan mayores y menores registros promedio de precipitación en la Figura 6.

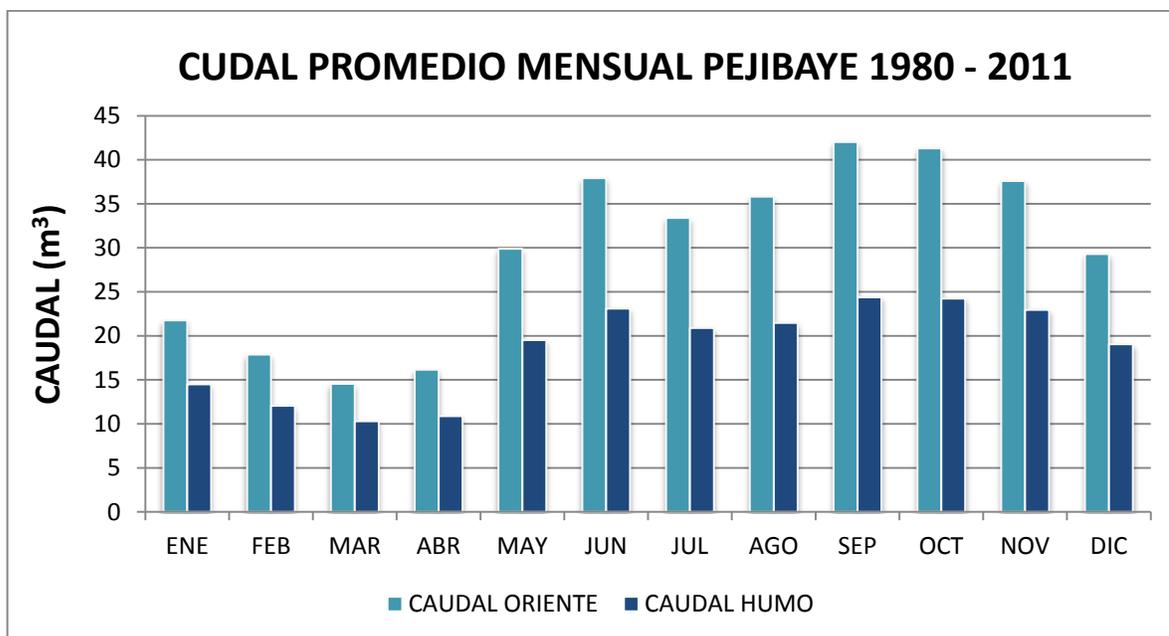


Figura 7. Caudales promedio cuenca del río Pejibaye (1980 - 2011) por estaciones.

3.3.7 Configuración del modelo SWAT

Las capas necesarias de datos espaciales y bases de datos se preparan para correr el modelo. El DEM se ha utilizado para la configuración de las cuencas hidrográficas y la parametrización topográfica. La cuenca ha sido dividida en 29 subcuencas de estudio de modelado con una superficie límite de 24.840 ha. Basado en el uso del suelo único y el tipo de suelo, las subcuencas se han dividido más a fondo en 357 HRUs para dar cuenta de la diversidad dentro de cada una de las sub cuencas. En la definición de HRUs, 5ha es el valor de umbral de uso de la tierra, la pendiente y área de suelo que se han considerado para ignorar usos menores tierra, la pendiente y tipos de suelo en cada subcuenca con el fin de evitar la gran cantidad innecesaria de HRUs (Neitsch et al. 2002).

En cuanto a las características actuales de uso del suelo se ha supuesto que son las mismas del año 2011 (Tabla 4), para la simulación de los escenarios de cambio climático y cambio de uso del suelo se utilizó el mapa de uso del suelo generado para el año 2030. Se utilizó el Método de Penman-Monteith (Heuvelmans et al. 2005; Kalin y Hantush 2006). Para calcular la evapotranspiración potencial (PET), para el índice de Manning se utilizó un valor de 0.05 y para el contenido inicial de agua en el suelo (FFCB) se estableció un valor de 0.8. Los primeros 4 años de simulación se han considerado como

un periodo de calentamiento para estabilizar el modelo (Srinivasan, R y Arnold, J. 1994). Para una descripción más detallada del modelo SWAT y su configuración véase Neitsch et al. (2002).

Tabla 4. Uso del Suelo (2011), Suelo y Pendientes reclasificados para el modelo SWAT.

	DESCRIPTION	SWAT CODE	AREA [ha]	% AREA/WATERSHED
LANDUSE	Forest-Mixed	FRST	20449.87	82.33
	Sugarcane	SUGC	1333.08	5.37
	Pasture	PAST	1014.35	4.08
	Range-Brush	RNGB	1269.45	5.11
	Apple*	APPL	70.52	0.28
	Coffee	COFF	600.33	2.42
	Residential-Low Density	URLD	101.98	0.41
SOILS	le-p		23.90	0.1
	le-so		4780.72	19.25
	lm-so		19591.57	78.87
	Ut-e		136.48	0.55
	Ut-fo		306.92	1.24
SLOPE	0-10		1498.40	6.03
	10-25		2970.09	11.96
	25-35		3475.00	13.99
	35-45		3841.36	15.46
	>45		13054.74	52.56

*Apple: Bosques Ribereños (Cativo) – Red Hídrica Originalmente

3.3.8 Calibración del modelo SWAT

La calibración del modelo SWAT para la cuenca del río Pejibaye se realizó mediante el uso del programa de calibración SWAT-CUP (Schuol et al. 2008 y Abbaspour, 2011), utilizando los registros de caudales observados durante un período de 32 años (1980 – 2011), sin embargo, solamente se emplearon los datos de los caudales mensuales de 28 años (1984 – 2011) para efectos de esta calibración, ya que, los datos correspondientes al periodo comprendido entre 1980 y 1983 se usaron para el “calentamiento” del modelo SWAT en la cuenca (Srinivasan, R y Arnold, J. 1994).

En lugar de la identificación de los valores de parámetros absolutos, la caracterización de los intervalos de parámetros es más importante (Bardossy y Singh, 2008). A partir de los rangos de parámetros iniciales, SUFI-2 es capaz de generar

combinaciones de parámetros diferentes, comparando simulaciones con observaciones, y la identificación de los rangos de parámetros óptimos. Por otra parte, en lugar de la calibración de los parámetros del modelo basado en respuestas hidrológicas de una sola salida en la cuenca, sufi-2 es capaz de simultáneamente calibrar los parámetros sobre la base de datos distribuidos dentro de una cuenca.

Los parámetros seleccionados en este estudio para el análisis de sensibilidad se basan en la descripción del área de estudio y la literatura (Heuvelmans et al. 2004, Chu y Shirmohammadi 2004, Gosain et al. 2006). Los parámetros del modelo fueron ajustados manualmente por ensayo y error basado en determinados indicadores estadísticos y las características de la zona de estudio. Los criterios utilizados para evaluar el ajuste hidrológico fueron el coeficiente de determinación (R^2), el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (ENS) (Nash y Sutcliffe 1970), el Factor P y el Factor R (d) (Abbaspour et al, 2007).

El coeficiente de determinación es un índice del grado de asociación lineal entre los valores observados y los simulados. La eficiencia de Nash-Sutcliffe indica qué tan bien la trama de datos simulados vs observados se encuentra cerca de la línea 1:1. Nash-Sutcliffe es el coeficiente más comúnmente utilizado en las calibraciones del modelo SWAT (Gassman et al. 2007), donde el valor óptimo de la eficiencia del modelo es 1. El Factor P es el porcentaje de los datos medidos dentro de la incertidumbre de predicción del 95% (95PPU). El 95PPU se calcula en el 2,5% y el 97.5% en niveles de la distribución acumulada obtenida a través del método del Hiper cubo Latino (Abbaspour et al, 2011, 2009, 2007) que elimina el 5% de las malas simulaciones. El Factor R (d) es la relación entre el espesor medio de la banda 95PPU y la desviación estándar de los datos medidos e indica la fuerza de la calibración, se representa mediante la amplitud del intervalo de incertidumbre y tiene que ser lo más pequeña como sea posible, según Abbaspour et al. (2007, 2009), Schuol et al. (2008a, 2008b), y Yang et al. (2008), para la condición ideal, el factor P debería tender hacia 1 y el Factor R debe ser cero.

La Tabla 5 presenta los parámetros en orden de sensibilidad y los valores finales para calibración del modelo en la cuenca para los dos puntos de observación, el primer punto de observación corresponde a la estación Humo (Cuenca Alta) y el segundo punto de observación corresponde a la estación Oriente (Cuenca Media - Baja), la calibración se realiza en su primera instancia en la parte alta de la cuenca, para posteriormente calibrar la parte baja de la cuenca Zhang et al. (2008), Abbaspour et al. (2007) y Yang et al. (2008).

Tabla 5. Valores de ajuste de parámetros para calibración del modelo por estaciones.

				ESTACION HUMO		
				Rango inicial		Valor de Ajuste
Sensibilidad	Acción*	Parámetros	Tipo	min	max	
1	V	ALPHA_BF	*.gw	0	1	0.001286
2	V	GW_REVAP	*.gw	0.02	0.2	0.066571
3	V	CH_N2	*.rte	-0.01	0.3	0.026429
4	V	ALPHA_BNK	*.rte	0	1	0.113571
5	V	GWQMN	*.gw	0	5000	13.042857
6	R	CN2	*.mgt	35	98	0.058429
7	V	GW_DELAY	*.gw	0	500	101.542854
8	V	CH_K2	*.rte	-0.01	500	86.785713
9	R	SOL_AWC (1)	*.sol	0	1	0.2785
10	V	ESCO	*.hru	0	1	0.906
				ESTACION ORIENTE		
				Rango inicial		Valor de Ajuste
Sensibilidad	Acción*	Parámetros	Tipo	min	max	
1	V	GW_DELAY	*.gw	0	500	30.209999
2	V	CH_K2	*.rte	-0.01	500	91.849998
3	V	CH_N2	*.rte	-0.01	0.3	0.05245
4	V	GW_REVAP	*.gw	0.02	0.2	0.1946
5	V	ALPHA_BF	*.gw	0	1	0.6143
6	R	CN2	*.mgt	35	98	0.0693
7	R	SOL_AWC (1)	*.sol	0	1	0.2596
8	V	GWQMN	*.gw	0	5000	0.122
9	V	ESCO	*.hru	0	1	0.905
10	V	ALPHA_BNK	*.rte	0	1	0.923

*R: Multiplicar por...

*V: Reemplazar valor por..

ALPHA_BF: factor alfa de caudal base (días); ALPHA_BNK: factor alfa del caudal base para el almacenamiento (días); CH_K2: conductividad hidráulica efectiva al canal principal (mm / h); CH_N₂: valor de índice de Manning para el canal principal; CN₂: SCS número de curva para escorrentía en condiciones de humedad; ; ESCO: Factor de compensación de la evaporación del suelo; GW_DELAY: tiempo de retardo de aguas subterráneas (días); GWQMN: Umbral de profundidad de agua en el acuífero superficial requerida para que el flujo de retorno que se produzca (mm); REVAP: Profundidad del Umbral de agua en el acuífero superficial o percolación; SOL_AWC: La capacidad disponible de agua en la capa de suelo (mm).

3.3.9 Escenarios de cambio climático para el modelo SWAT

El acoplamiento entre los Modelos Climáticos Globales (GCM) y los modelos hidrológicos puede utilizarse para estimar los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos de una cuenca (Zhang et al., 2011). Para este estudio se utilizaron los datos de cambio climático (precipitación (%) y temperatura (media)) a nivel de la cuenca del río Pejibaye correspondientes al GCM HadCM3 (Gordon et al. 2000; Jones et al. 2004), ya que es uno de los GCM que mejor predice la variabilidad climática en Costa Rica (IPCC 2002, 2007a, 2007b; IMN 2008, 2012; CEPAL 2011).

Se emplearon las familias de escenarios A2 (Emisiones altas de GEI) y A1B (Emisiones medias de GEI). Los escenarios A2 describen un mundo heterogéneo, autosuficiente y que mantiene las identidades locales, las tasas de crecimiento de población convergen lentamente, lo cual resulta en un elevado crecimiento de la poblacional. El crecimiento económico per cápita es más lento y fragmentado que en otras familias (IPCC 2002). Los escenarios A1B representan un mundo con un uso equilibrado de los combustibles fósiles y no fósil como fuente de energía principal (IPCC 2002).

Se procesó la información meteorológica de la cuenca (recopilada por las estaciones meteorológicas del ICE para el periodo 1980 – 2011) utilizando las anomalías mensuales de los escenarios A2 y A1B para el periodo comprendido entre los años 2012 al 2030 con base a los registros de clima (1961 – 1990), información que se recopiló de www.climatewizard.org (TNC 2009). Los datos finales se obtuvieron mediante la multiplicación de la precipitación diaria con el porcentaje de variación y a la temperatura máxima y mínima diaria se le sumó el incremento predicho en las anomalías para cada uno de los escenarios. A partir de la información climática generada para el año 2030, se crearon las bases de datos climáticas necesarias para las simulaciones del modelo SWAT (Neitsch et al. 2005a, 2005b) para los dos escenarios A2 y A1B, en el periodo 2012 – 2030. De esta manera se establecieron 4 simulaciones con el modelo SWAT (Tabla 6) donde se contemplaron los diferentes escenarios climáticos (A2 y A1B) para el GCM HadCM3 y el cambio en el uso del suelo en la cuenca del río Pejibaye al año 2030.

Tabla 6. Simulaciones con escenarios de Cambio Climático y Cambio de Uso del Suelo

SIMULACIÓN	GCM	ESCENARIO	CUS
1	HadCM3	A2	Sin CUS*
2	HadCM3	A2	CUS 2030
3	HadCM3	A1B	Sin CUS*
4	HadCM3	A1B	CUS 2030

*Sin CUS: Se utilizó el mapa de uso del suelo 2011 para la simulación

3.4 Resultados y discusión

3.4.1 Cambio de uso del suelo

En la tabla 7, se muestra los resultados de los cambios de uso del suelo entre el mapas de uso del suelo del año 1998 y el año 2011 generados a partir de la interpretación de fotos aéreas e imágenes satelitales respectivamente, determinándose para el año de 1998 una dominancia del Bosque Denso (82.23%) seguida por las zonas en Regeneración (5.87%), la Caña de Azúcar (4.84%) , los Sistemas Forestales – Café (4.41%) y por debajo de estos porcentajes los demás usos. Para el año 2011, se mantiene una dominancia de uso de suelo con el Bosque Denso (82.33%), seguida de la Caña de Azúcar (5.37%), luego por las zonas en Regeneración (5.11%), los Pastos (4.08%) por último los Sistemas Forestales – Café (2.42%) y por debajo de estos porcentajes los demás usos.

Tabla 7. Cambio de Uso del Suelo periodo 1998 - 2011.

USO	1998		2011		Tasa de Cambio		Tasa Anual
	%	Ha	%	Ha	Ha	%	Ha (x año)
Bosque Denso	82.23	20425.53	82.33	20449.87	24.34	0.12	1.87
Caña de Azúcar	4.84	1202.84	5.37	1333.08	130.24	10.83	10.01
Pastos	2.23	553.81	4.08	1014.35	460.54	86.16	35.38
Regeneración	5.87	1457.57	5.11	1269.45	-188.12	-12.91	-14.47
Ríos	0.28	70.51	0.28	70.52	0.00	0.00	0.00
Sistemas Forestales	4.41	1095.07	2.42	600.33	-494.74	-45.18	-38.06
Zona Urbana	0.14	34.25	0.41	101.98	67.74	197.79	5.21

Por lo tanto, las áreas que mostraron mayores cambios con respecto al año 1998, fueron: Los Pastos con un aumento del 86.16% (460.54 Ha) lo que representa un aumento anual de 35.38 Ha, los Sistemas Forestales – Café con una disminución del 45.18% (-494.74Ha) lo que representa una disminución anual de 38.06 Ha, las zonas de Regeneración con una disminución del 12.91% (-188.12 Ha), en lo que respecta la Zona Urbana 197.79% (67.74 Ha), la Caña de Azúcar con un aumento del 10.83% (130.24 Ha) lo que representa un aumento de 10.01 Ha al año y el Bosque Denso con un aumento del 0.12% (24.34Ha).

La predominancia de la cobertura de Bosque Denso (82.23% y 82.33%) y las zonas en Regeneración (5.87% - 5.11%) en la cuenca durante el periodo 1998 – 2011,

puede explicarse gracias a las políticas de conservación de la vegetación natural de Costa Rica y los incentivos económicos por parte de instituciones como el ICE y programas como FONAFIFO para conservar los recursos naturales a través de diferentes programas como el de pagos por servicios ambientales.

Los cambios más significativos en este periodo están ligados a la reducción de las zonas con Sistemas Forestales (Café principalmente), donde se observa una disminución del 4.41% para el año 1998 a 2.42% (- 494.74 Ha) para el año 2011, y el aumento en las áreas de cultivo de Caña de Azúcar y los Pastos, que van de un 4.84% para el año 1998 a un 5.37% (+ 130.24 Ha) en el año 2011 y de un 2.23% en 1998 a 4.08% (+ 460.54 Ha) en el 2011 respectivamente. Esto se puede explicar gracias a la baja de los precios internacionales del Café y el gradual deterioro en la cantidad y calidad del producto en este periodo de tiempo, lo que genera mejores beneficios económicos para los productores por la caña de azúcar en lugar del café en esta área (CATIE, 2011 y Virgilio E.M., 2011), además, por la proximidad del Ingenio Azucarero de Atirro y la migración temporal y permanente de los pobladores hacia otras zonas para emplearse en diferentes actividades. El incremento en las zonas con cobertura de Pastos se explica también gracias a que la actividad ganadera dentro de la cuenca sigue siendo una de las principales fuentes de ingresos para los productores (Virgilio E.M., 2011).

3.4.2 Modelación de mapa de uso del suelo para el 2030

En la tabla 8 y la figura 8, se muestran las proyecciones de uso del suelo para el año 2030, donde se mantiene la predominancia de las zonas de Bosque Denso (79.92%) y seguida de la Caña de Azúcar (5.78%). Mediante comparaciones entre los mapas de uso de suelo del año 2011 y 2030 (Tabla 8), los Pastos aumentarán en 295.22 Ha (29.10%). En cuanto a las zonas de Regeneración se espera un aumento de 153.57 Ha (12.10%), para los Sistemas Forestales – Café se espera un aumento del 1.44% (8.65 Ha) y para la Zona Urbana, se espera un crecimiento del 39.64% representado por 40.43 Ha.

Tabla 8. Cambio de Uso del Suelo periodo 2011 - 2030.

USO	2011		2030		Tasa de Cambio		Tasa Anual
	%	Ha	%	Ha	Ha	%	Ha (x año)
Bosque Denso	82.33	20449.87	79.92	19848.86	-601.01	-2.94	-33.4
Caña de Azúcar	5.37	1333.08	5.78	1436.23	103.15	7.74	5.7
Pastos	4.08	1014.35	5.27	1309.57	295.22	29.10	16.4
Regeneración	5.11	1269.45	5.73	1423.02	153.57	12.10	8.5
Ríos	0.28	70.52	0.28	70.52	0.00	0.00	0.00

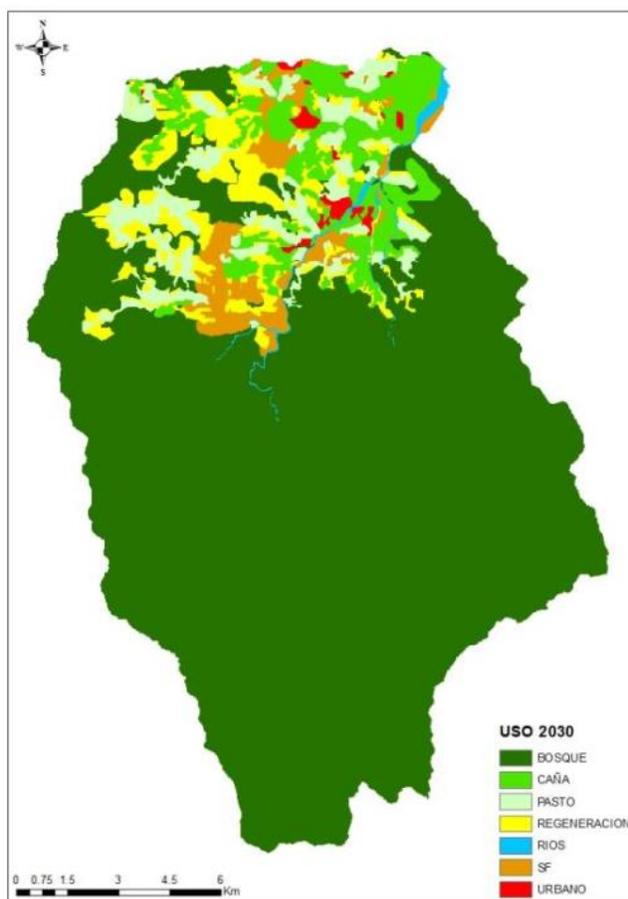
Sistemas Forestales	2.42	600.33	2.45	608.98	8.65	1.44	0.5
Zona Urbana	0.41	101.98	0.57	142.41	40.43	39.64	2.5

Tabla 9. Probabilidades de transición de uso del suelo esperadas para el 2030.

	SF	CA	BD	P	R	OTR	SUM
SF	0.1092	0.3491	0.0416	0.2369	0.2122	0.0511	1
CA	0.1017	0.3577	0.0283	0.2439	0.2055	0.0628	1
BD	0.002	0.0018	0.9931	0.0013	0.0017	0.0001	1
P	0.1109	0.3008	0.0276	0.2912	0.2496	0.0199	1
R	0.1023	0.2646	0.0455	0.265	0.3043	0.0183	1
OTR	0.0001	0.0007	0	0.0001	0.0001	0.999	1

BD: Bosque Denso; CA: Caña de Azúcar; P: Pastos; R: Regeneración; SF: Sistemas Forestales – Café; OTR: Otros (Zona Urbana y Ríos).

Figura 8. Uso del Suelo proyectado de la cuenca del río Pejibaye al 2030



La tabla 9 muestra las probabilidades de transición para el año 2030, con base a la información de los mapas de uso de suelo de 1998 y 2011. Se muestra en diagonal las matrices de probabilidades que indican la persistencia en cuanto a los diferentes usos del suelo (color celeste); de modo que para el Bosque Denso y Otros (zona urbana y ríos) la persistencia se presenta en un 0.99 (99%), los Sistemas Forestales – Café en 0.1 (10%), los Pastos en 0.29 (29%), la Caña de Azúcar con un 0.35 (35%) y las zonas de Regeneración en 0.30 (30%). Mientras tanto, los otros valores indican las probabilidades de ganar (FILA) y perder (COLUMNA) superficies en los diferentes usos de suelo; de tal modo, que, la Caña de Azúcar, los Pastos y las zonas con Regeneración, presentan las mayores probabilidades de transición para ganar superficies.

Los cambios más significativos en la cobertura de uso del suelo, esperados para el año 2030, están representados con el aumento de los Pastos, las zonas de Regeneración y la Caña de Azúcar, con un 29.10%, 12.10% y 7.74% respectivamente, en relación al año 2011. Se espera además que, la cobertura de Bosque Denso se reduzca en un 2.94% que podría estar explicada por el aumento en las zonas de pastoreo ya que, según Brown et al (2000) las actividades ganaderas están relacionado con la reducción de la cobertura forestal.

El incremento en las zonas con Regeneración y la pérdida de algunas zonas de Bosque Denso, también pueden estar ligadas a las actividades ganaderas, ya que, según Pezo e Ibrahim (1996), la ganadería tradicional con pastos sin árboles, en los últimos 30 años, va siendo sustituida paulatinamente por las zonas con pastos con árboles dispersos (zonas de Regeneración). Estos sistemas son la forma de producción bovina más común en América central. Por lo tanto, la regeneración natural de árboles se realiza con el fin de proporcionar sombra y alimento al ganado, así como para obtener productos maderables (Pezo e Ibrahim 1996; Esquivel 2005; Velásquez 2005).

La proyección de uso del suelo para el 2030, mediante el modelo CA_MARKOV (Idrisi Selva), muestran una tendencia en el incremento para las categorías de Pastos, zonas de Regeneración, Caña de Azúcar, estas transiciones reducen indirectamente la cobertura de Bosque Denso en 2.94% para los próximos 18 años, teniéndose que en cuenta que las matrices de cambio continúen con la misma intensidad entre 1998 y 2011. Según Feldman et al. (2005), Ozah et al. (2012) y Paegelow y Camacho Olmedo (2005), el modelo CA_MARKOV (siempre y cuando este calibrado) realiza una buena aproximación de los cambios futuros en el uso del suelo, convirtiéndose en una importante herramienta para la toma de decisiones en el territorio (Benito et al. 2010).

3.4.3 Calibración del modelo SWAT

El análisis de sensibilidad resultó en la selección de los parámetros que fueron calibrados en el modelo SWAT para la parte alta y media - baja de la cuenca como se

indica en la Tabla 5. Esta tabla muestra los parámetros más sensibles para el caudal simulado en la cuenca, los cuales se ajustaron a los valores predeterminados de SWAT para ajustar el modelo simulado con el caudal observado.

El caudal del modelo fue calibrado con una incertidumbre del 10%, en primera instancia se calibró la parte alta de la cuenca (Figura 9) con los datos mensuales de la estación de aforo Humo (Tabla 2 y 3), posteriormente, con los datos mensuales de la estación de aforo Oriente (Tabla 2 y 3) se calibró la parte baja de la cuenca (Figura 10). Los datos mensuales utilizados para la calibración en la parte alta y baja de la cuenca corresponden al periodo 1984- 2011 ya que se tomó 4 años (1980 – 1983) para el calentamiento del modelo SWAT de acuerdo con los criterios de Srinivasan, R y Arnold, J. (1994).

Después de ajustar los parámetros para la calibración de los caudales simulados en el modelo SWAT, se obtuvo para la cuenca alta del río Pejibaye (Estación Humo) un $R^2 = 0,69$, $ENS = 0.63$, $P \text{ factor} = 0.61$ y $R \text{ factor} = 0.3$ (Figura 11). Posteriormente para la cuenca media baja del río Pejibaye (Estación Oriente) se obtuvo un $R^2 = 0.82$, $ENS = 0.80$, $P \text{ factor} = 0.6$ y $R \text{ factor} = 0.1$ (Figura 12). Según Shanti et al. (2001), Moriasi et al. (2007), Abbaspour et al. (2007, 2009), Schuol et al. (2008a, 2008b), y Yang et al. (2008), un R^2 mayor o igual a 0.60 y un ENS mayor o igual a 0.60 con valores mensuales de datos observados (caudales), representan una bondad de ajuste buena, por otro lado, un R^2 mayor o igual a 0.75 y un ENS mayor o igual a 0.75 con valores mensuales de datos observados (caudales), representan una bondad de ajuste excelente.

Para la simulación mensual, en general, el caudal simulado se adapta muy bien con los valores observados. La eficiencia de Nash y el coeficiente de correlación son valores que demuestran un muy buen ajuste para el período de análisis, lo que demuestra la gran capacidad que tiene el modelo en predecir los valores promedios mensuales de caudal, se evidencia también que SWAT-CUP es práctico y fiable al ser utilizado para la calibración y análisis de la incertidumbre de modelos de cuencas (Abbaspour et al. 2007, 2009, 2011).

Los resultados sugieren la importancia de la calibración de múltiples sitios. Sin esto, la variación espacial dentro de la cuenca se oculta (Takken et al., 1999), lo que sugiere la importancia de recopilar datos espacialmente distribuidos (cuando estén disponibles) para llevar a cabo la calibración de múltiples sitios en la cuenca (Zhang et al., 2008).

Figura 9. Calibración de caudales en la cuenca alta (Est. Humo) del río Pejibaye.

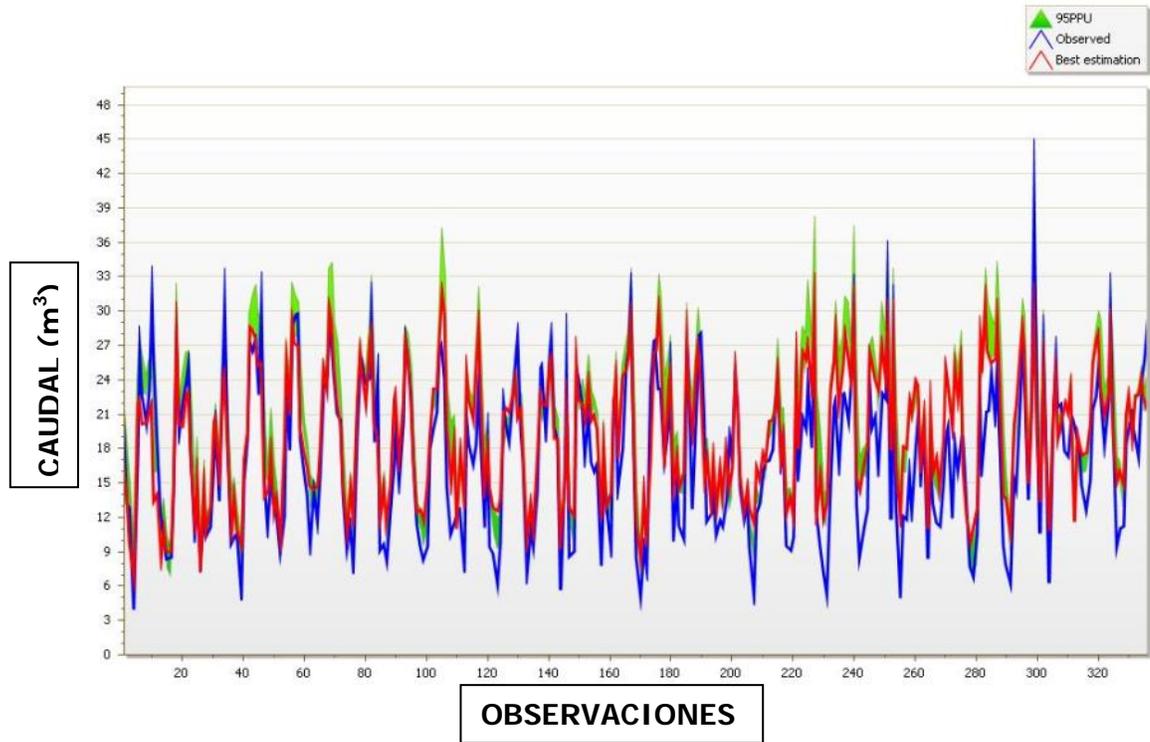


Figura 10. Calibración de caudales cuenca media-baja (Est. Oriente) del río Pejibaye.

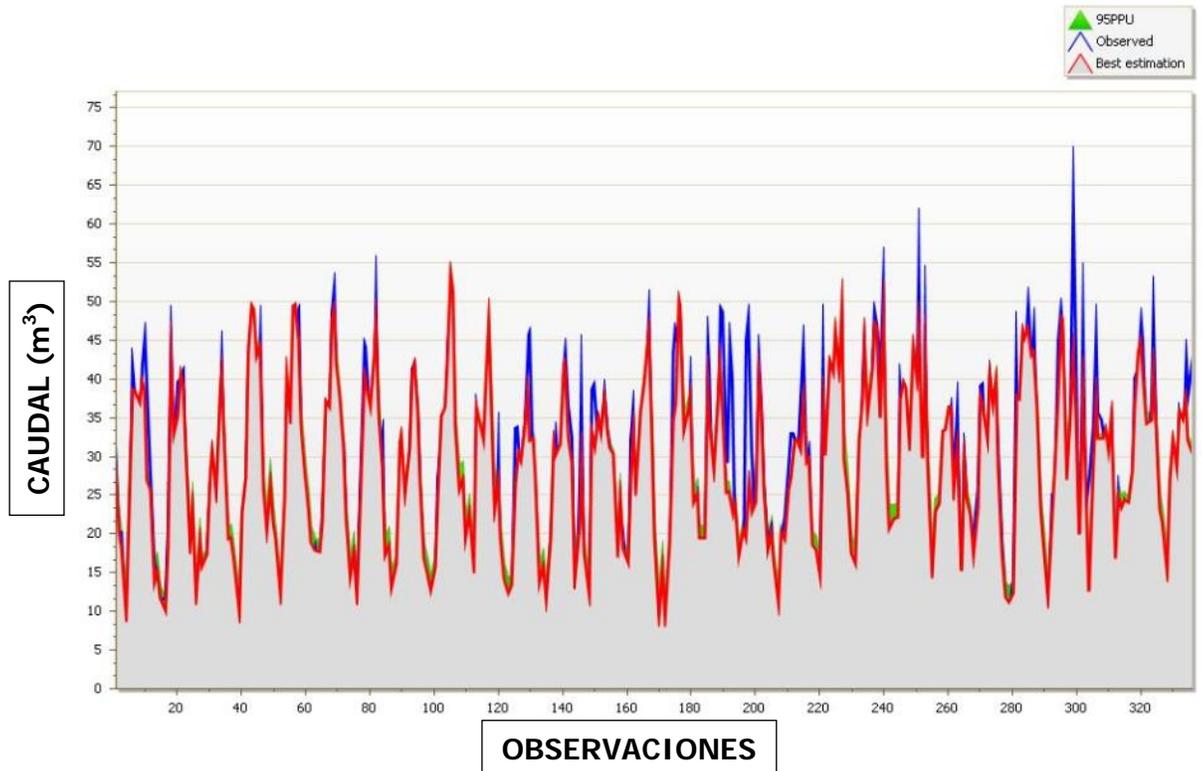


Figura 11. Caudales Simulados vs. Observados en la cuenca alta del río Pejibaye.

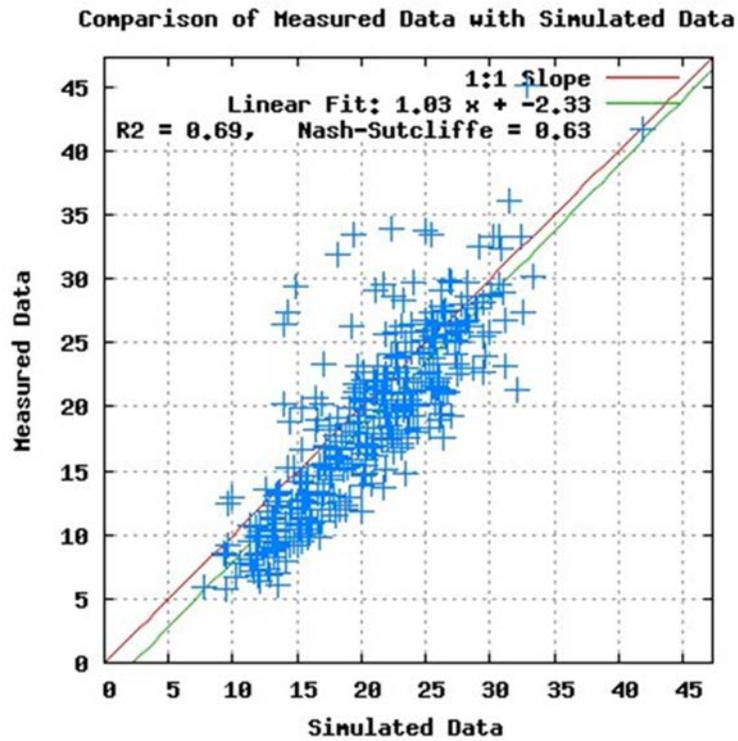
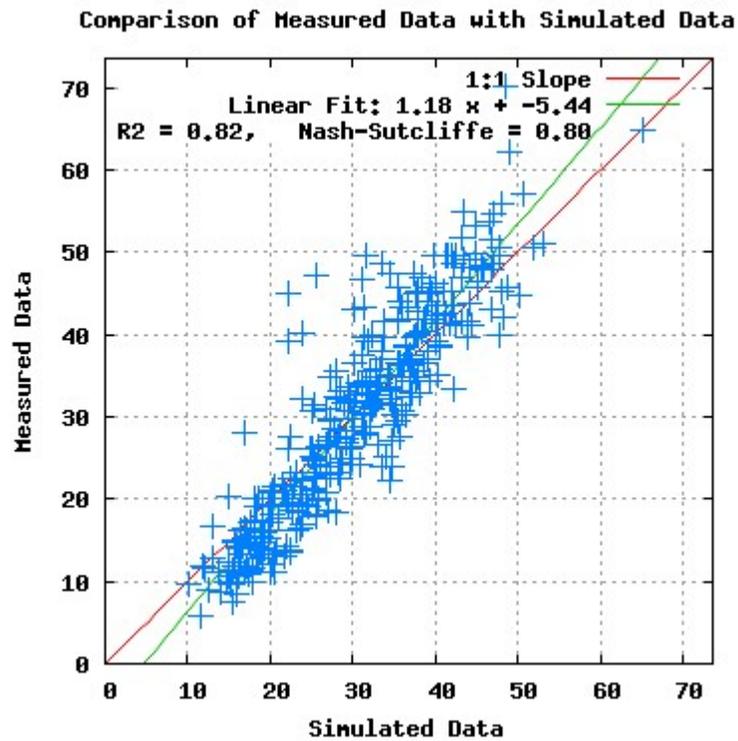


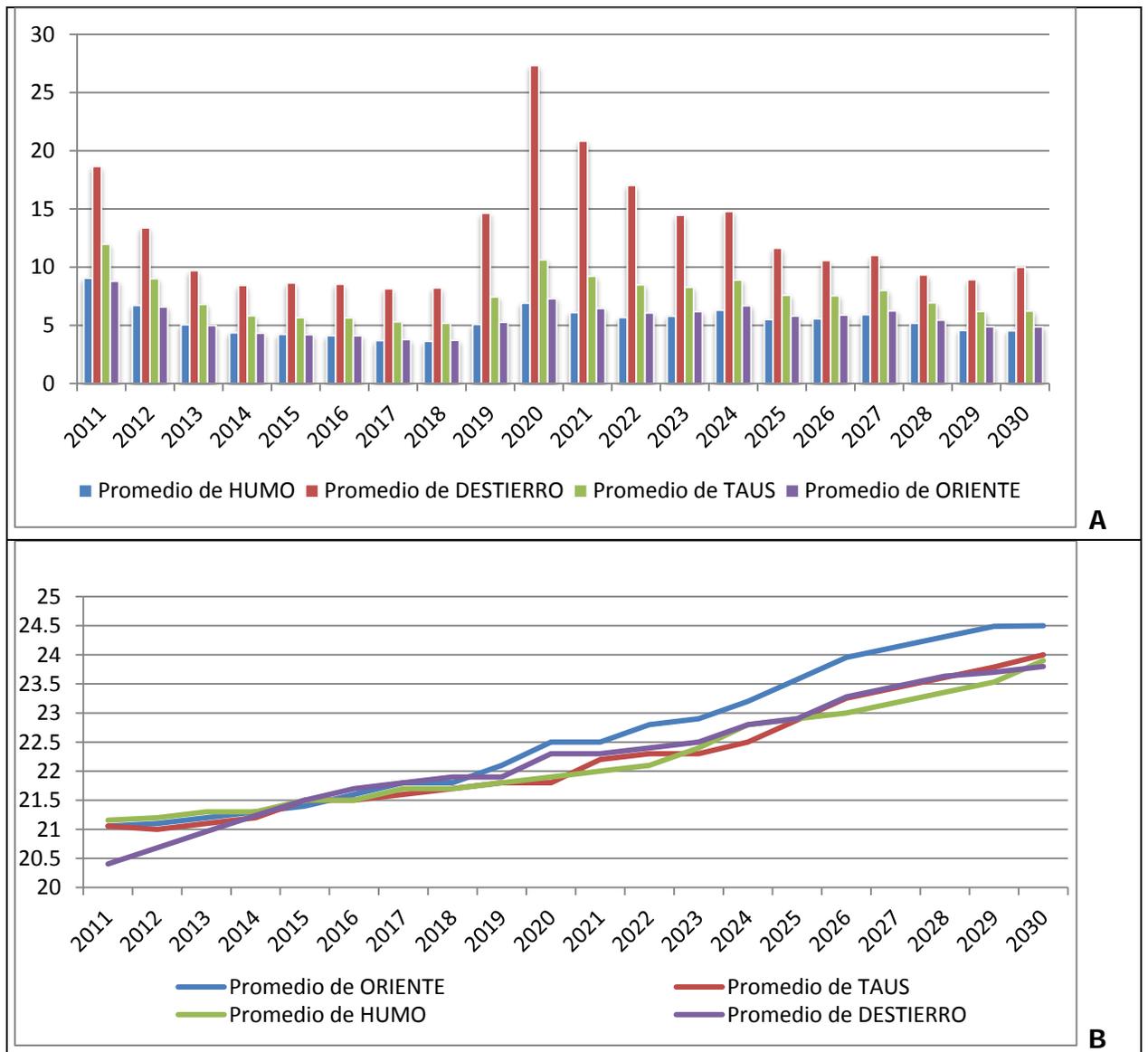
Figura 12. Caudales Simulados vs. Observados. Cuenca media - baja del río Pejibaye.

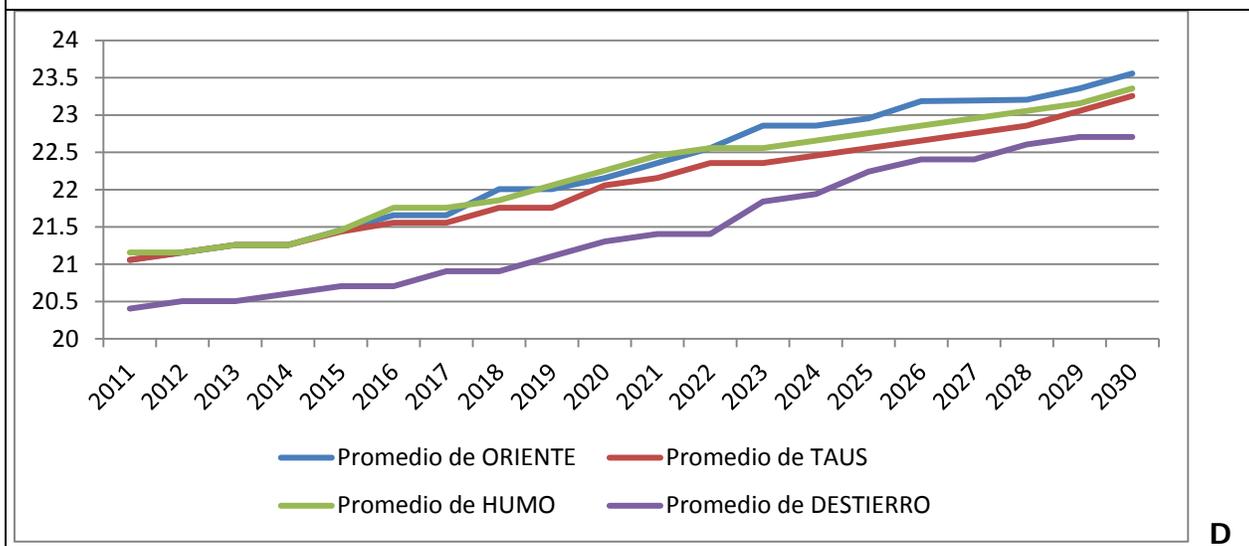
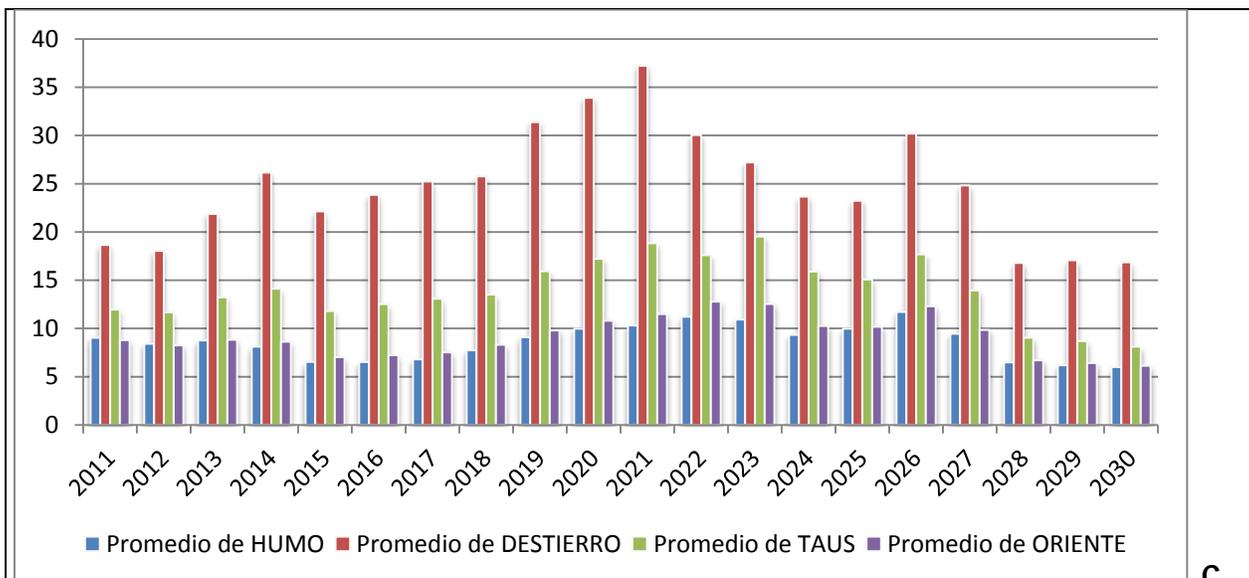


3.4.4 Efectos del cambio climático y el cambio de uso del suelo en los caudales de la cuenca del río Pejibaye al 2030

La figura 13, muestra la proyección de la precipitación promedio diaria y la temperatura media diaria por estación en la cuenca del río Pejibaye para el año 2030 con relación al año 2011, mediante el análisis de las anomalías del GCM HadCM3 (Gordon et al. 2000; Jones et al. 2004) con escenarios de las familias A2 (Emisiones altas de GEI) y A1B (Emisiones medias de GEI) según el IPCC (2002).

Figura 13. Proyección de precipitación promedio diaria (mm) y temperatura media diaria (°C) según GCM HadCM3 al 2030.





- A: Escenario A2, Precipitación promedio diaria por año por estación (mm)
- B: Escenario A2, Temperatura media diaria por año por estación (°C)
- C: Escenario A1B, Precipitación promedio diaria por año por estación (mm)
- D: Escenario A1B, Temperatura media diaria por año por estación (°C)

En cuanto al escenario A2, el patrón observado muestra una reducción de la precipitación promedio diaria anual en el periodo 2012 – 2018, posteriormente se observa un incremento en el promedio en el periodo 2019 – 2021 con un pico máximo (año 2020) de 27.3 mm diarios (Estación Destierro), a partir del año 2022 se muestra un descenso paulatino en los promedios hasta llegar al año 2030 donde se espera una disminución del 47.1% en el promedio diario de precipitación a nivel de la cuenca con relación al año 2011. Para la temperatura, el patrón muestra un incremento paulatino en el periodo 2012 – 2030, esperándose un aumento de 2.9°C en la temperatura media diaria de la cuenca con relación al año 2011.

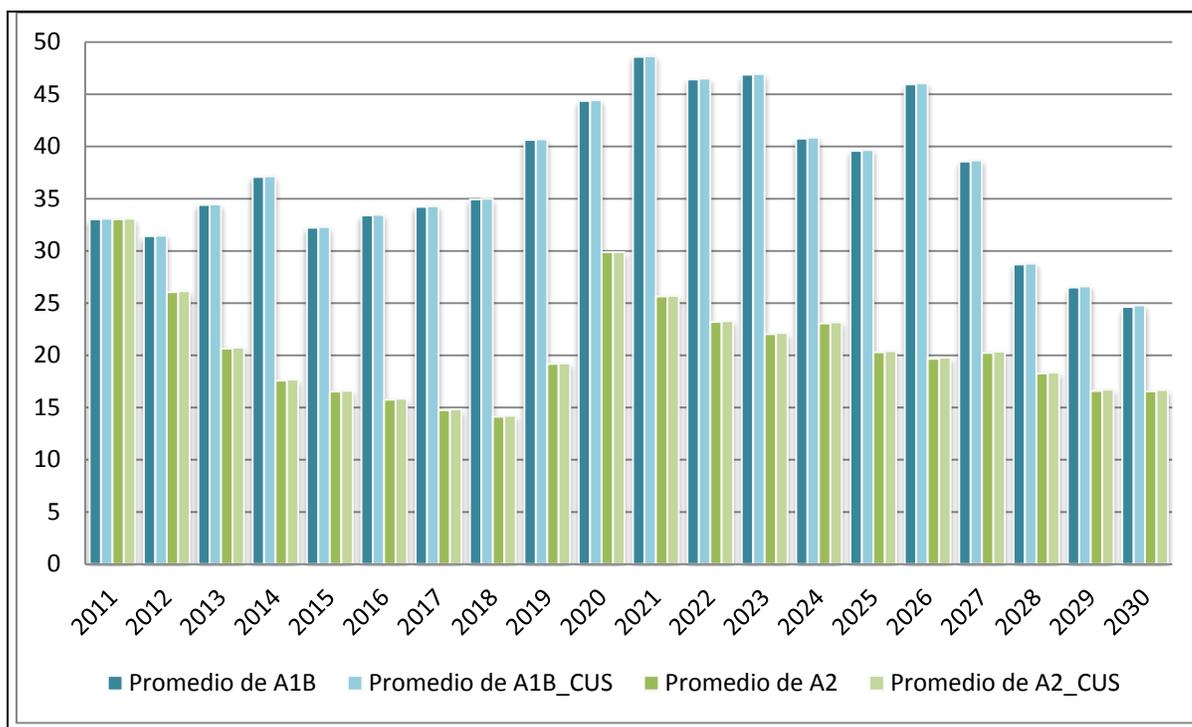
Para el escenario A1B, el patrón observado muestra un incremento gradual en la precipitación promedio diaria anual en el periodo 2012 – 2021, donde, el pico máximo (año 2021) es de 37.2 mm diarios (Estación Destierro) y un promedio diario anual a nivel de cuenca de 19.5 mm diarios. A partir del año 2022, el patrón muestra un descenso paulatino en los promedios hasta llegar al año 2030 donde se espera una disminución del 23.3% en el promedio diario de precipitación a nivel de la cuenca en relación al año 2011. Para la temperatura, el patrón muestra un incremento paulatino en el periodo 2012 – 2030, esperándose un aumento de 2.1°C en la temperatura media diaria de la cuenca con relación al año 2011.

Al comparar globalmente el comportamiento de los dos escenarios (A2 y A1B) podemos decir que para el escenario A2 esperamos una disminución drástica de las precipitaciones promedio en la cuenca con un aumento de la temperatura paulatino, mientras que para el escenario A1B se espera un aumento gradual en las precipitaciones promedio y un aumento gradual de la temperatura (menor que el escenario A2) en la cuenca para el periodo 2012 – 2030, sin embargo en los dos escenarios se espera una reducción en el promedio de las precipitaciones en el año 2030 con relación al promedio del año 2011.

En la figura 14, se muestran los resultados de la modelación de caudal en la cuenca del río Pejibaye usando el modelo SWAT calibrado para el escenario BASE (año 2011, sin cambio climático) con proyecciones de cambio climático estimado por el GCM HadCM3 para escenarios A2 y A1B que estiman las variaciones del clima para el año 2030 (temperatura y precipitación); así mismo, se utilizó la cobertura de uso del suelo del año 2011 como escenario BASE donde se asume que no existió cambio de uso del suelo y el mapa de uso del suelo del año 2030, mismo que fue obtenido a partir de la modelación de los mapas de uso de suelo de 1998 y 2011 mediante el modelo CA_MARKOV del programa IDRISI SELVA.

El patrón observado en los caudales promedio anuales simulados en SWAT, para el periodo 2012- 2030, con un escenario de cambio climático A1B (pcp, tmp), muestra un incremento paulatino en el promedio anual en el periodo 2012 – 2023 alcanzando un pico máximo (año 2021) de 48.6 m³, a partir del año 2024 se muestra un descenso en los promedios hasta el año 2030 donde se espera una disminución del 25.3% en relación al año 2011 lo que representa un caudal promedio al año 2030 de 24.7m³. Así mismo, se muestra dentro del patrón de las simulaciones, que tanto el escenario con cambio de uso del suelo (mapa 2030) como el escenario sin cambio de uso del suelo (mapa 2011) tienen valores promedio de caudal similares para todos los años dentro de las simulaciones con el modelo SWAT.

Figura 14. Proyección de caudal promedio anual (m^3) según GCM HadCM3 al 2030.



Promedio A1B: Escenario A1B (pcp, tmp) sin cambio de uso del suelo (mapa 2011).

Promedio A1B_CUS: Escenario A1B (pcp, tmp) con cambio de uso del suelo (mapa 2030).

Promedio A2: Escenario A2 (pcp, tmp) sin cambio de uso del suelo (mapa 2011).

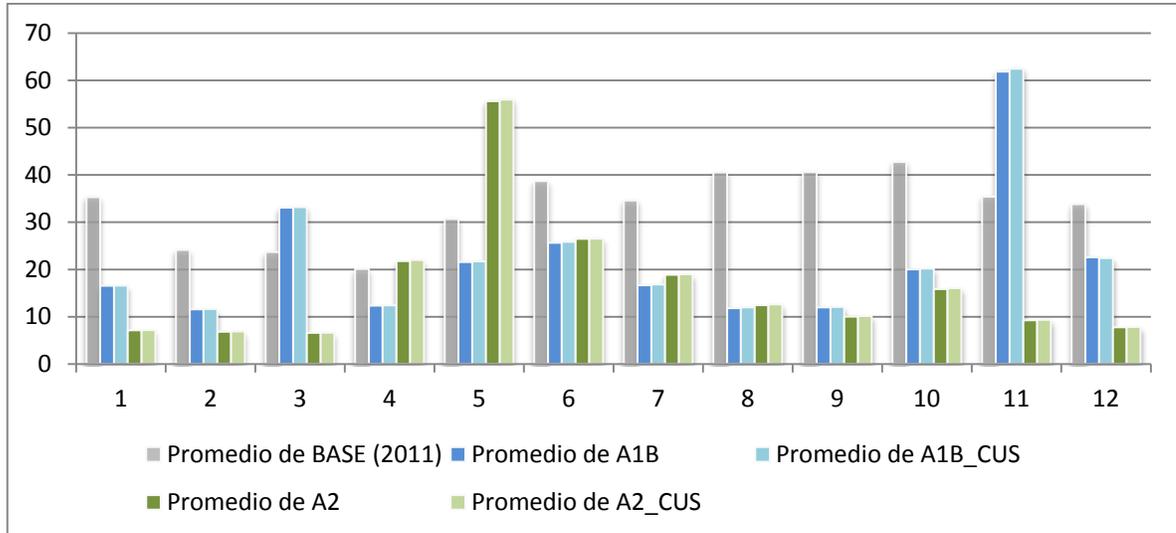
Promedio A2_CUS: Escenario A2 (pcp, tmp) con cambio de uso del suelo (mapa 2030).

El patrón observado en los caudales promedio anuales simulados en SWAT, para el periodo 2012- 2030, con un escenario de cambio climático A2 (pcp, tmp), muestra un decrecimiento paulatino en el promedio anual en el periodo 2012 – 2018 alcanzando un pico mínimo (año 2018) de $14.1 m^3$, a partir del año 2019 se muestra un aumento en los promedios hasta el año 2020 alcanzando un pico máximo (año 2020) de $29.9 m^3$, a partir del año 2021 se evidencia nuevamente una reducción en los promedios de los caudales hasta llegar al año 2030, donde se espera una disminución del 49.7% en relación al año 2011 lo que representa un caudal promedio al año 2030 de $16.6m^3$. Así mismo, se muestra dentro del patrón de las simulaciones, que tanto el escenario con cambio de uso del suelo (mapa 2030) como el escenario sin cambio de uso del suelo (mapa 2011) tienen valores promedio de caudal similares para todos los años dentro de las simulaciones con el modelo SWAT.

En la figura 15, se muestran los resultados de la modelación mensual de caudal en la cuenca del río Pejibaye usando el modelo SWAT calibrado para el escenario BASE (año 2011, sin cambio climático) con proyecciones de cambio climático estimado por el GCM HadCM3 para escenarios A2 y A1B que estiman las variaciones del clima para el año 2030 (temperatura y precipitación); así mismo, se utilizó la cobertura de uso del suelo del año 2011 como escenario BASE donde se asume que no existió cambio de uso del suelo y

el mapa de uso del suelo del año 2030 para las simulaciones con cambio de uso del suelo.

Figura 15. Caudal promedio mensual (m³) HadCM3 al 2030 vs. Escenario BASE (2011).



Promedio BASE: Escenario calibrado en SWAT (año 2011) uso del suelo (mapa 2011).

Promedio A1B: Escenario A1B (pcp, tmp) sin cambio de uso del suelo (mapa 2011).

Promedio A1B_CUS: Escenario A1B (pcp, tmp) con cambio de uso del suelo (mapa 2030).

Promedio A2: Escenario A2 (pcp, tmp) sin cambio de uso del suelo (mapa 2011).

Promedio A2_CUS: Escenario A2 (pcp, tmp) con cambio de uso del suelo (mapa 2030).

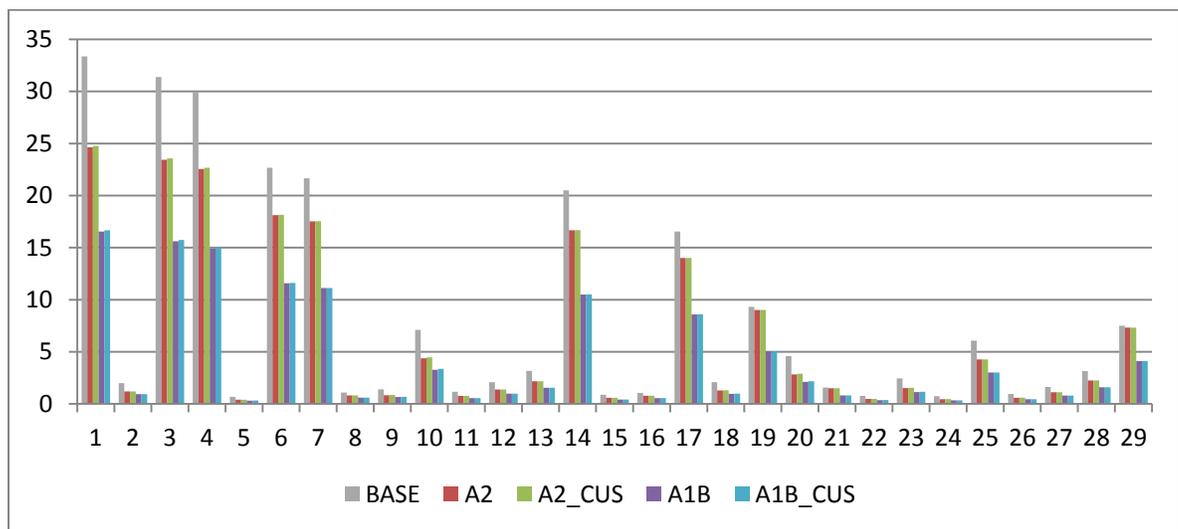
El patrón observado en los caudales promedio mensuales simulados en SWAT, para el año 2030 en relación al año 2011 (año BASE), denota una disminución en los caudales promedios mensuales para los dos escenarios (A2 y A1B) en relación a los del año BASE (2011), salvo ciertos meses en los cuales los caudales promedio de los escenarios A2 y A1B exceden a los del año BASE, tal es el caso del mes de marzo y el mes de noviembre para el escenario A1B con caudales promedio de 33 m³ y 62m³ respectivamente en relación al mes de marzo y noviembre del año BASE con 23.7m³ y 35.4m³ respectivamente. Para el escenario A2, solamente en el mes de mayo (2030) se observa un incremento en el caudal promedio en relación al año BASE (2011) con 55.9m³ y 30.7m³ respectivamente.

Por lo tanto, para el año 2030 se espera para el escenario A1B una disminución del 25.3% en relación al año 2011 lo que representa un caudal promedio al año 2030 de 24.7m³. Para el escenario A2, se espera una disminución del 49.7% en relación al año 2011 lo que representa un caudal promedio al año 2030 de 16.6m³. Nuevamente, se muestra dentro del patrón de las simulaciones, que tanto en los escenarios con cambio de uso del suelo (mapa 2030) como en los escenarios sin cambio de uso del suelo (mapa 2011) tienen valores mensuales promedio de caudal similares para todos los meses dentro de las simulaciones con el modelo SWAT.

En la figura 16, se muestran los resultados de la modelación de caudal promedio por subcuencas en la cuenca del río Pejibaye usando el modelo SWAT calibrado para el escenario BASE (año 2011) y las proyecciones de cambio climático estimado por el GCM HadCM3 (año 2030) para los escenarios A2 y A1B (temperatura y precipitación). Se utilizó la cobertura de uso del suelo del año 2011 como escenario BASE donde se asume que no existió cambio de uso del suelo y el mapa de uso del suelo del año 2030 para las simulaciones con cambio de uso del suelo.

El patrón observado en los caudales promedio por subcuencas simulados en SWAT para el año 2030 en relación al año 2011 (BASE), denota que los valores promedio de caudal son similares para los escenarios A2 con cambio de uso del suelo (mapa 2030) y sin cambio de uso del suelo (mapa 2011) en cada una de las 29 subcuencas simuladas. Se observa el mismo comportamiento para las simulaciones con el escenario A1B.

Figura 16. Caudal promedio por subcuencas (m³) según GCM HadCM3al 2030 y escenario BASE (2011) en la cuenca del río Pejibaye.



BASE: Escenario calibrado en SWAT (año 2011) uso del suelo (mapa 2011).

A1B: Escenario A1B (pcp, tmp) sin cambio de uso del suelo (mapa 2011).

A1B_CUS: Escenario A1B (pcp, tmp) con cambio de uso del suelo (mapa 2030).

A2: Escenario A2 (pcp, tmp) sin cambio de uso del suelo (mapa 2011).

A2_CUS: Escenario A2 (pcp, tmp) con cambio de uso del suelo (mapa 2030).

En cuanto a los caudales simulados para el año 2030 se espera para el escenario A1B una disminución del 25.3% en relación al año 2011 lo que representa un caudal promedio al año 2030 de 24.7m³. Para el escenario A2, se espera una disminución del 49.7% en relación al año 2011 lo que representa un caudal promedio al año 2030 de 16.6m³. De esta manera, para el escenario A2, se espera una disminución del 47.1% en el promedio diario de precipitación a nivel de la cuenca en relación al año 2011 y un aumento de 4.7°C en la temperatura media diaria de la cuenca en relación al año 2011. Para el escenario A1B, se espera una disminución del 23.3% en el promedio diario de

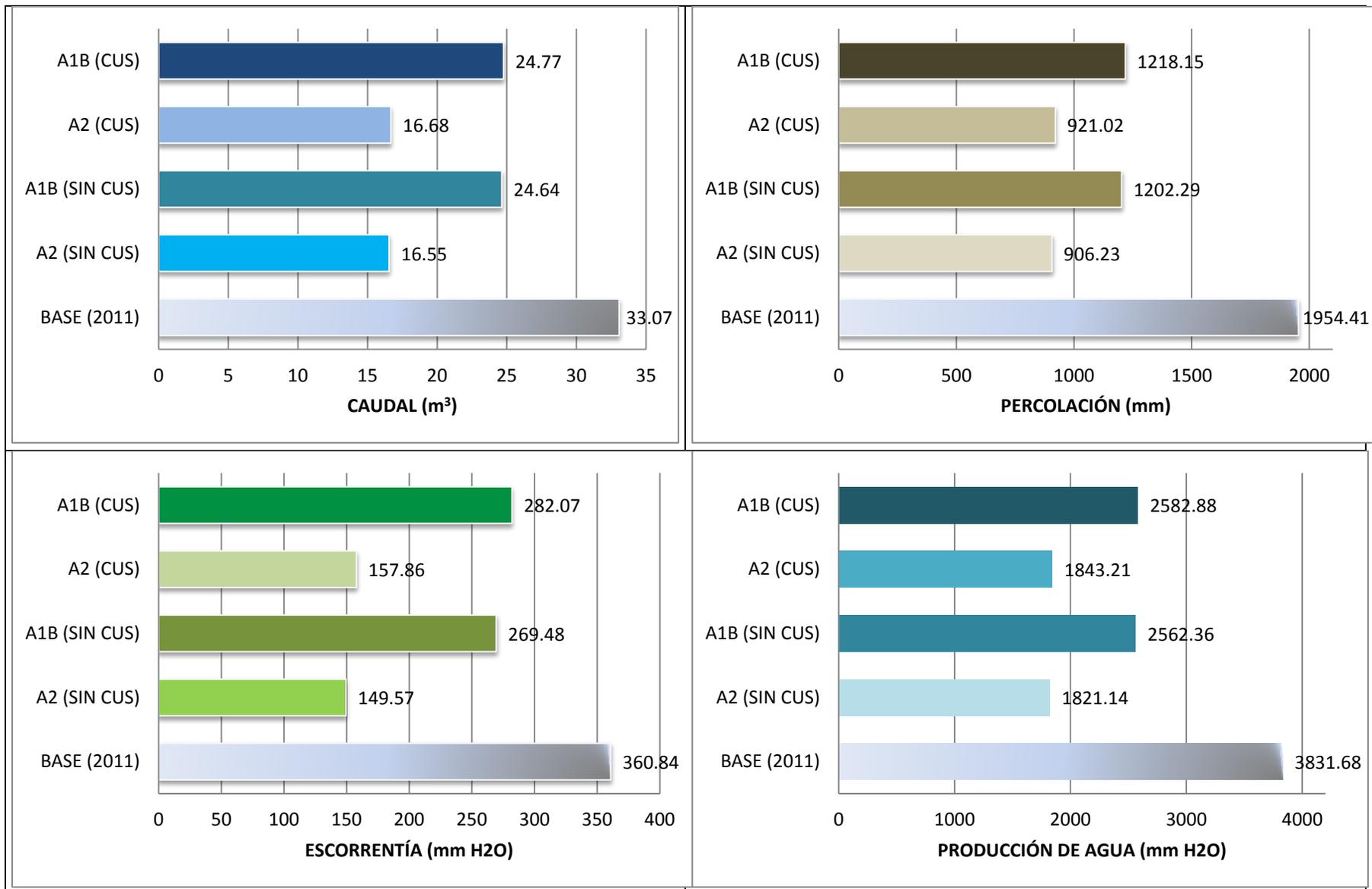
precipitación a nivel de la cuenca en relación al año 2011 y un aumento de 3.6°C en la temperatura media diaria de la cuenca en relación al año 2011.

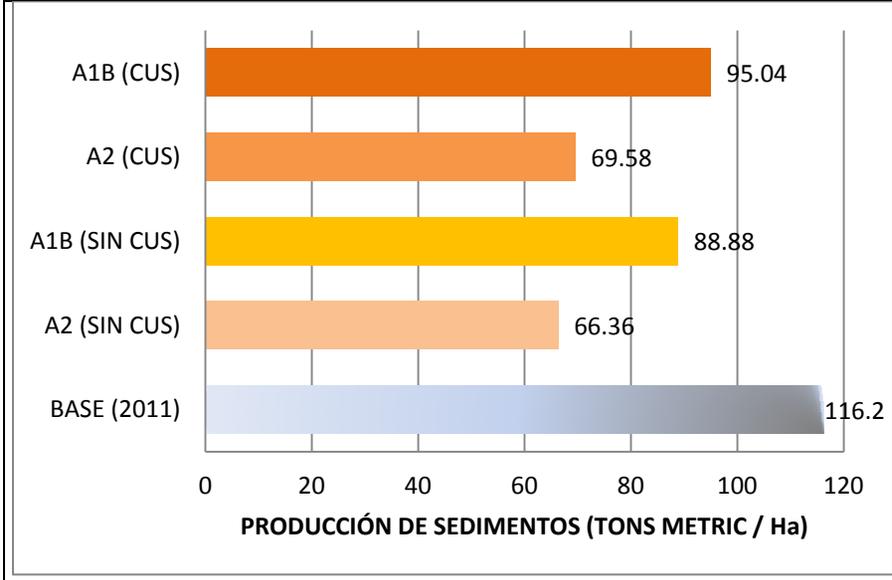
En la figura 17 y la tabla 10, se muestran los resultados promedio de la modelación usando el modelo SWAT calibrado al 2011, con las proyecciones de cambio climático (precipitación y temperatura) estimadas por el GCM HadCM3 para el año 2030, tanto para el escenario A2 como para el A1B; así mismo, se utilizó el mapa de cobertura de uso del suelo del 2030 para los escenarios con cambio de uso del suelo y se utilizó el mapa de uso del suelo del 2011 para los escenarios donde se consideró que no existió cambios en el uso del suelo.

Tabla 10. Efectos del CC y el CUS en la cuenca del río Pejibaye al 2030.

	ESCENARIOS						
	<u>Sin Cambio de Uso del Suelo (2030)</u>						
PARÁMETRO	BASE 2011	A2	A1B	A2 - BASE	%	A1B - BASE	%
Caudal (m ³)	33.07	16.55	24.64	-16.52	-49.97	-8.43	-25.50
Percolación (mm)	1954.41	906.23	1202.29	-1048.17	-53.63	-752.12	-38.48
Escorrentía (mmH ₂ O)	360.84	149.57	269.48	-211.27	-58.55	-91.36	-25.32
Producción de Agua(mmH ₂ O)	3831.68	1821.14	2562.36	-2010.54	-52.47	-1269.32	-33.13
Producción de Sedimentos (tons metric /ha)	116.20	66.36	88.88	-49.84	-42.89	-27.33	-23.52
	<u>Con Cambio de Uso del Suelo (2030)</u>						
PARÁMETRO	BASE 2011	A2	A1B	A2 - BASE	%	A1B - BASE	%
Caudal (m ³)	33.07	16.68	24.77	-16.39	-49.57	-8.30	-25.09
Percolación (mm)	1954.41	921.02	1218.15	-1033.39	-52.87	-736.26	-37.67
Escorrentía (mmH ₂ O)	360.84	157.86	282.07	-202.97	-56.25	-78.76	-21.83
Producción de Agua(mmH ₂ O)	3831.68	1843.21	2582.88	-1988.48	-51.90	-1248.80	-32.59
Producción de Sedimentos (tons metric/ha)	116.20	69.58	95.04	-46.62	-40.12	-21.17	-18.21

Figura 17. Efectos del CC y el CUS en la cuenca del río Pejibaye al 2030.





BASE (2011): Escenario Base calibrado en SWAT (año 2011) uso del suelo (mapa 2011).

A2 (SIN CUS): Escenario A2 al 2030 (pcp, tmp) sin cambio de uso del suelo (mapa 2011).

A1B (SIN CUS): Escenario A1B al 2030 (pcp, tmp) sin cambio de uso del suelo (mapa 2011).

A2 (CUS): Escenario A2 al 2030 (pcp, tmp) con cambio de uso del suelo (mapa 2030).

A1B (CUS): Escenario A1B al 2030 (pcp, tmp) con cambio de uso del suelo (mapa 2030).

Como se muestra en las figuras 17, 18, 19 y la tabla 10, todos los parámetros se vieron afectados de manera negativa ante los escenarios de cambio climático (A2 y A1B) y se evidencia que los valores de los parámetros no varían significativamente en los escenarios con cambio de uso del suelo (CUS) (mapa 2030) y sin cambio de uso del suelo (CUS) (mapa 2011).

Para los escenarios A2 y A1B sin CUS se espera una reducción de caudal correspondiente a 49.97% y 25.50% respectivamente en relación al año 2011. No se muestra una variación importante en relación a los valores de caudal obtenidos para los escenarios con CUS donde se espera una reducción del 49.57% y 25.09% para el escenario A2 y A1B respectivamente en relación al año 2011.

Para la percolación (Figura 17 – Tabla 10), se espera para el año 2030 una reducción del 53.63% y 38.48% para los escenarios A2 y A1B sin CUS respectivamente en relación al año 2011. Para los escenarios A2 y A1B con CUS se muestran valores similares a los obtenidos en la simulación sin CUS, donde se espera una reducción del 52.87% para el escenario A2 y 37.67% para el escenario A1B.

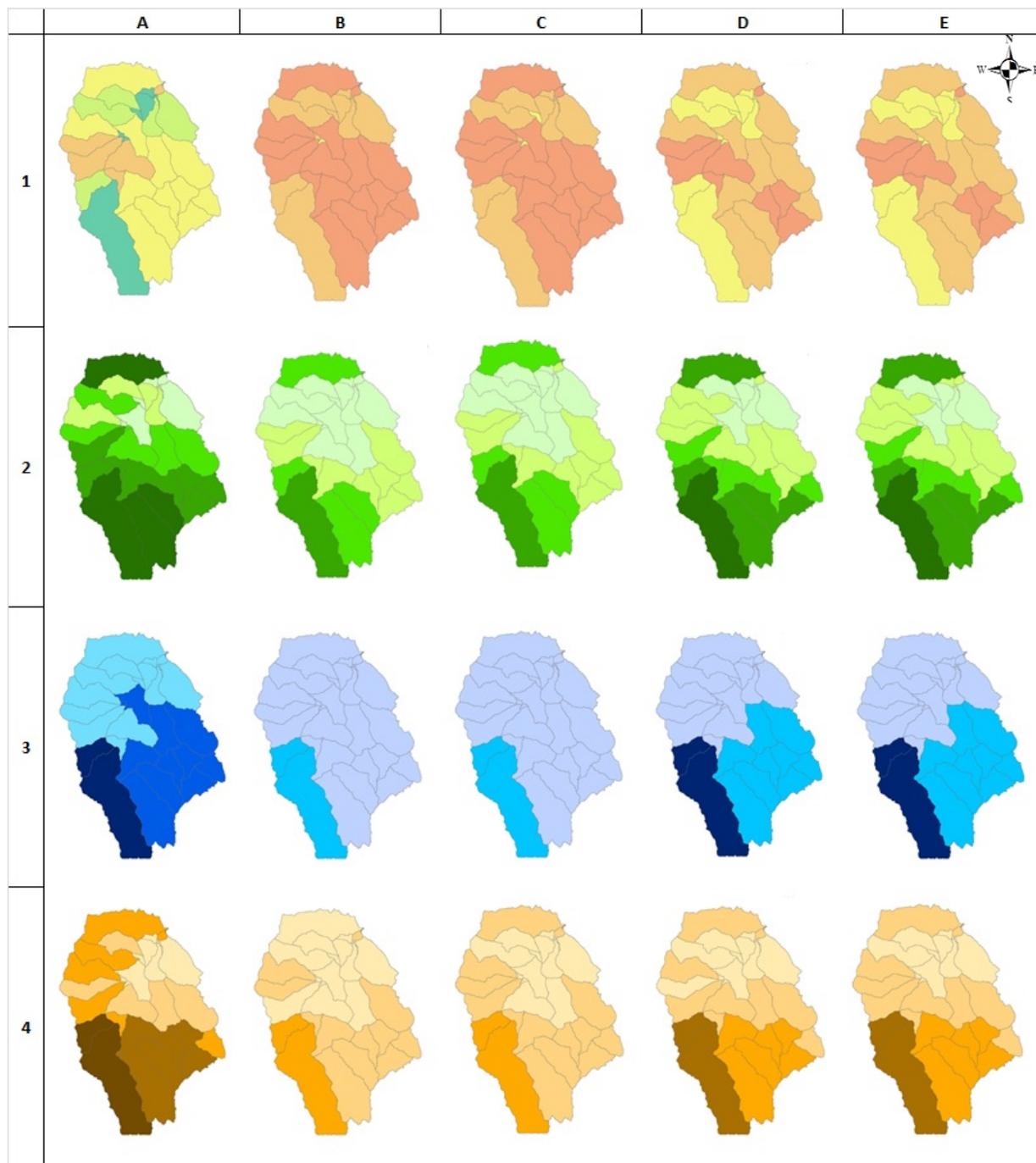
En cuanto a la escorrentía (Figura 17 – Tabla 10), se esperan valores similares para los escenarios A2 con y sin CUS, con una reducción del 58.55% y 56.25% respectivamente. Se encuentra la misma similitud de valores para el escenario A1B en las simulaciones con y sin CUS, con una reducción del 25.32% y 21.83% respectivamente.

La producción de agua (Figura 17 – Tabla 10) también se ve afectada ante los escenarios de cambio climático y se muestran similares valores para los escenarios simulados con CUS y sin CUS. Siendo así que, para el escenario A2 se espera una reducción del 52.47% y 51.90% para los escenarios sin CUS y con CUS respectivamente, en relación al año 2011. Para el escenario A1B se estima una reducción del 33.13% y 32.59% para las simulaciones con CUS y sin CUS respectivamente, en relación al año 2011.

Por otro lado, en la producción de sedimentos (Figura 17 – Tabla 10) se espera una disminución del 42.89% y 40.12% en el escenario A2 sin CUS y con CUS respectivamente, en relación al año 2011. Para el escenario A1B, se espera una reducción del 23.52% y 18.21% sin CUS y con CUS respectivamente, en relación al año 2011. Cabe destacar que el modelo no fue calibrado para sedimentos ya que SWAT no toma en cuenta en las simulaciones la ocurrencia de eventos naturales extremos (Arnold y Fohrer, 2005; Neitsch et al., 2005a, b) como por ejemplo tormentas, deslizamientos o movimientos en masa, los últimos, contribuyen de manera parte importante en la producción de sedimentos en la cuenca gracias a las características topográficas y edáficas de la cuenca, aun cuando el 80% de la cuenca está cubierta por bosque denso. Debido a esto el modelo subestima la producción de sedimentos en la cuenca en relación a los valores observados en los datos históricos medidos en la cuenca por el Instituto Costarricense de Electrificación.

En la figura 18, se muestran los mapas generados para los diferentes parámetros estudiados a nivel de subcuenca (Percolación, Escorrentía, Producción de Agua y Producción de Sedimentos).

Figura 18. Efectos del CC y el CUS por subcuenca en el río Pejibaye al 2030.



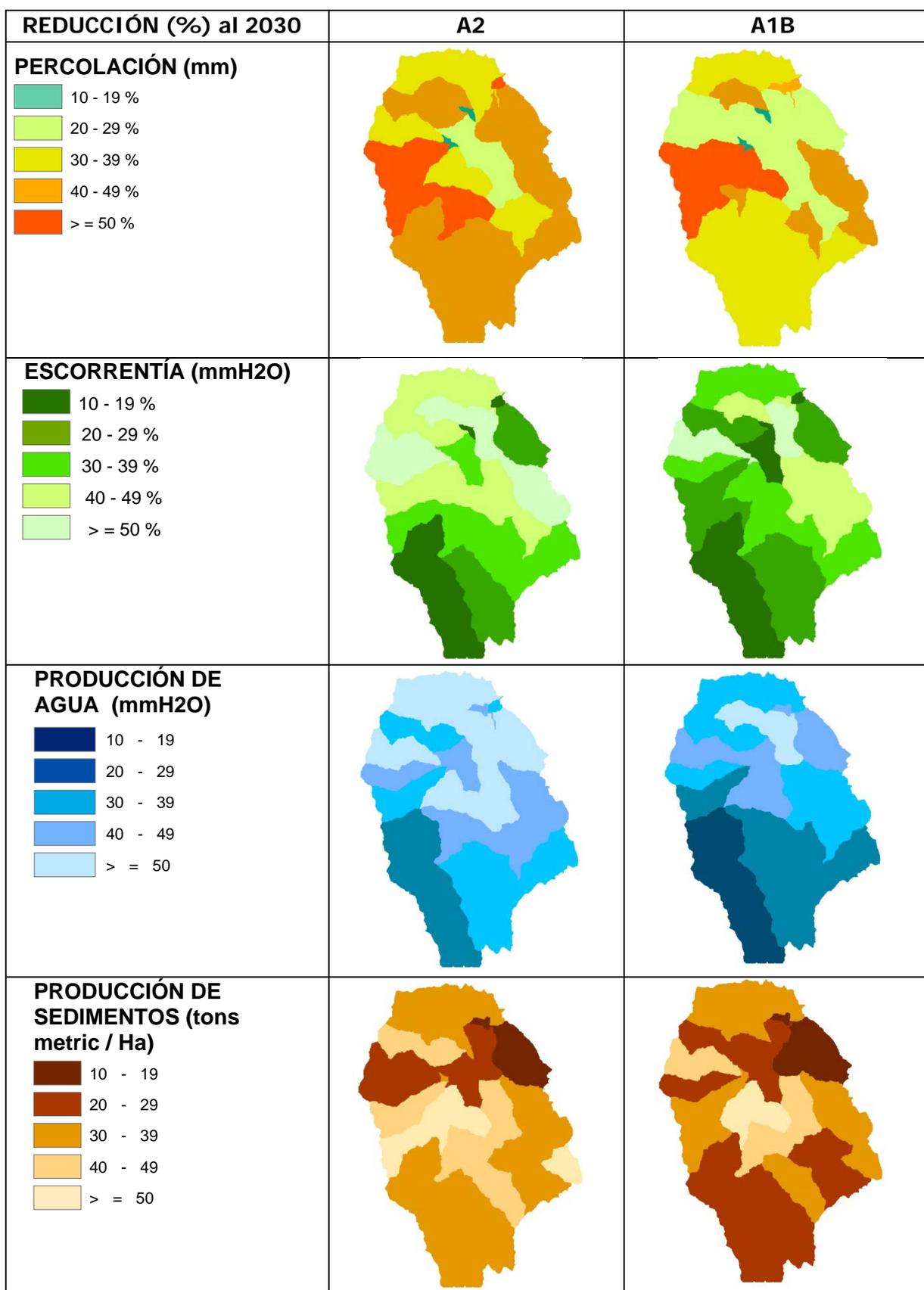
1: PERCOLACIÓN (mm)	2: ESCORRENTÍA (mmH2O)	3: PRODUCCIÓN DE AGUA (mm H2O)	4: PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS (tons metric / Ha)
 400 - 930	 20 - 316	 1445 - 2447	 0 - 97
 931 - 1460	 317 - 612	 2448 - 3449	 98 - 195
 1461 - 1990	 613 - 908	 3450 - 4451	 196 - 293
 1991 - 2520	 908 - 1204	 4452 - 5453	 294 - 391
 2521 - 3050	 1205 - 1500	 5454 - 6455	 392 - 488

A	Escenario Base calibrado en SWAT (año 2011), uso del suelo (mapa 2011).
B	Escenario A2 al 2030 (pcp, tmp) sin cambio de uso del suelo (mapa 2011).
C	Escenario A2 al 2030 (pcp, tmp) con cambio de uso del suelo (mapa 2030).
D	Escenario A1B al 2030 (pcp, tmp) sin cambio de uso del suelo (mapa 2011).
E	Escenario A1B al 2030 (pcp, tmp) con cambio de uso del suelo (mapa 2030).

Como muestran los resultados, todos los componentes analizados (Caudal, Percolación, Escorrentía, Producción de Agua y Producción de Sedimentos) fueron sensibles a las variaciones climáticas de precipitación y temperatura estimadas para el año 2030 por el GCM HadCM3 para los escenarios A2 y A1B, con respecto al escenario BASE (año 2011). Según el IPCC (2002, 2007a, 2007b), el IMN (2008, 2012) y CEPAL (2011) el HadCM3 es el GCM que ha prestado mejores aciertos del clima en Costa Rica y Centroamérica comparados con los datos medidos en las estaciones climáticas centroamericanas. En Estudios realizados en el trópico Africano y las Islas Canarias (España) por Candela et al. (2009) utilizando el modelo HADCM3, se determinó que los parámetros que rigen el balance hídrico de una cuenca con escenarios de clima A2 y A1B, han experimentado reducciones entre un 21% y un 45% de los valores promedio anuales de los parámetros, todo esto condicionado por las condiciones climáticas, suelos, vegetación y topografía de las zonas de estudio. Esto concuerda con los valores obtenidos para los diferentes parámetros analizados dentro de este estudio mediante el modelo SWAT.

Por otra parte, los resultados mostraron que los parámetros analizados en este estudio, presentan cambios porcentuales muy similares (para los dos escenarios climáticos: A2 y A1B) con cambio de uso del suelo y sin cambio de uso dentro de la cuenca, lo que nos dice que el cambio de uso del suelo proyectado para el año 2030 no es un factor determinante en el comportamiento de los parámetros que rigen el balance hídrico y la producción de sedimentos en la cuenca del río Pejibaye; concordando con Li et al. (2009), que presenta en sus estudios (Trópico Asiático) que la disminución del agua puede estar más afectada por la variabilidad climática (influye en 77%) que por el cambio de uso del suelo (influye en 18%), de manera que el cambio del clima influye de manera importante en la hidrología de la cuenca.

Figura 19. Tasa de cambio promedio por escenario climático al 2030 respecto al 2011.



A2	Diferencia entre: Escenario Base en SWAT (año 2011) y Promedio entre Escenario A2 Sin CUS (uso 2011) y Escenario A2 con CUS (uso 2030).
A1B	Diferencia entre: Escenario Base en SWAT (año 2011) y Promedio entre Escenario A1B sin CUS (uso 2011) y Escenario A1B con CUS (uso 2030).

En la figura 19 se muestra de manera espacial a nivel de la cuenca del río Pejibaye la tasa de cambio promedio por escenario climático (A2 y A1B), la misma que se generó encontrando la diferencia entre el Escenario Base (año 2011) modelado en SWAT y el promedio entre los escenarios climáticos A2 y A1B con CUS y sin CUS (dado que el CUS proyectado para la cuenca no resultó ser un factor que incide significativamente en los componentes que rigen el balance hídrico) modelados en SWAT al año 2030 para los diferentes parámetros estudiados (Percolación, Escorrentía, Producción de Agua y Producción de Sedimentos) los cuales reflejan una reducción porcentual promedio con base al año 2011 para los dos escenarios (A2 y A1B).

Para la percolación (mm), se espera para el año 2030 una reducción promedio en la cuenca del 53% y 37% para el escenario A2 y A1B respectivamente con base al año 2011, en cuanto a la escorrentía (mmH₂O), se espera para el año 2030 una reducción promedio en la cuenca del 57% y 23% para el escenario A2 y A1B respectivamente con base al año 2011. La producción de agua (mmH₂O) en la cuenca se verá afectada para el año 2030 por una reducción promedio del 52% y 32% para el escenario A2 y A1B respectivamente con base al año 2011, para la producción de sedimentos (Toneladas métricas / Ha), se espera para el año 2030 una reducción promedio en la cuenca del 41% y 21% para el escenario A2 y A1B respectivamente con base al año 2011.

Cabe resaltar que las predicciones hidrológicas de los parámetros del estudio actual fueron analizadas bajo un escenario proyectado (2030) de cambio de uso del suelo donde no se tomaron en cuenta factores como el aumento en la densidad de la vegetación (factor que influye en la evapotranspiración), producto del aumento de la temperatura y el aumento en la concentración de CO₂ en el futuro (Abbaspour et al., 2009).

En cuanto a los caudales simulados para el año 2030 dentro de la cuenca que muestran una reducción del 49.9% y 25.3% para el escenario A2 y A1B respectivamente, se muestra una concordancia con Tu (2009), el mismo que afirma en sus estudios que el cambio climático puede reducir en un 50% los caudales en las cuencas. Así mismo, CEPAL (2011) menciona que la disponibilidad de agua en las cuencas podría verse afectada hasta en un 63%. Según Chien et al. (2013) la mayoría de las predicciones futuras de caudales basadas en GCM indican reducciones en los caudales entre los años 2020 – 2095. Aguilar et al. (2005) menciona que, en Centroamérica y la parte alta de Suramérica, la temperatura se ha incrementado de manera significativa en las últimas décadas, lo que conlleva a la modificación de las condiciones climatológicas y por ende

una variación en los regímenes de precipitación y producción de caudales.

Los resultados de este estudio coinciden de igual manera con los estudios de Imbach et al. (2008, 2011), los cuales señalan que los regímenes hidrológicos serán potencialmente afectados por el cambio climático debido a una combinación de impactos sobre la distribución y funciones de los ecosistemas, cambios en los patrones y la variabilidad de la temperatura y precipitación. Estos cambios, combinados con cambios en los patrones de desarrollo (por ejemplo, crecimiento poblacional y desarrollo económico), van a modificar la provisión de los servicios hidrológicos a la población en Mesoamérica. De esta manera se espera que en algunas regiones exista un incremento y en otras una reducción en la provisión de agua para la población.

Cabe mencionar que el caudal proyectado al 2030 fue estimado en base a un solo GCM con dos escenarios y es ampliamente reconocido que existen grandes discrepancias entre los diferentes GCM, discrepancias que representan una importante fuente de incertidumbre (Wilby y Harris 2006, Ghosh y Majumdar 2008). Por lo tanto, la excesiva dependencia de un solo GCM podría conducir a una planificación inadecuada del recurso hídrico dentro de la cuenca.

Los análisis de la variabilidad del caudal sugieren que las diferentes cuencas dentro de diferentes regiones dentro de un país tienen diferentes respuestas a los posibles escenarios de cambio climático (Hay et al., 2011; Roots, 1989). Una posible explicación es que la respuesta hidrológica de una determinada cuenca puede estar dominada por diferentes procesos hidrológicos que tienen que ver con topografía, el clima, los suelos, la cobertura vegetal y los procesos antrópicos dentro de la cuenca (Grayson y Blöschl, 2000; Sivakumar, 2004, 2008).

Este estudio se basó en un análisis realizado con un modelo hidrológico en un posible escenario de cambio climático. El análisis se limita a ilustrar la tendencia y magnitud de los cambios de caudal de una cuenca en relación con posibles cambios en la temperatura y las precipitaciones. Se necesitan análisis adicionales que complementen este estudio tales como el uso de diferentes GCMs y estudios de erodabilidad de los cauces en la cuenca y el aporte de sedimentos al caudal del río Pejibaye producido por fenómenos de remoción en masa.

3.5 Conclusiones

La dinámica de cambio de uso del suelo en la cuenca en los periodos 1998 – 2011 y 2011 – 2030 muestra una predominancia de la cobertura de Bosques Densos (ubicados en la parte media y alta de la cuenca) a través del tiempo. En la parte baja de la cuenca, donde se encuentra predominantemente la zona de cultivos, se espera un aumento de las zonas cubiertas por pastos, zonas de regeneración y los cultivos de caña de azúcar y una reducción en las áreas cubiertas por cafetales.

Los factores más relevantes que han determinado los cambios de uso del suelo en la cuenca del río Pejibaye entre los periodos 1998- 2011 y 2011 - 2030, están ligados a la reducción de las zonas con Sistemas Forestales – Café, ya que, debido a la baja de los precios internacionales del café, el gradual deterioro de los suelos, la baja productividad (café), los mejores beneficios económicos recibidos por la siembra de caña de azúcar, la proximidad del Ingenio Azucarero de Atirro y el aumento de la actividad ganadera, se han incrementado las zonas para la siembra de la caña de azúcar y los pastos.

El modelo SWAT fue calibrado con datos de caudal mensual naturales históricos del Instituto Costarricense de Electricidad (ICE), y fue capaz de reproducir satisfactoriamente el caudal, con coeficientes de NS de 0,63 y un R2 de 0.69 para calibración de la cuenca alta y con coeficientes de NS de 0,80 y un R2 de 0.82 para calibración de la cuenca media baja, lo que demuestra la efectiva capacidad que tiene el modelo SWAT en predecir los valores promedios mensuales de caudal, se evidencia también que SWAT-CUP es práctico y fiable al ser utilizado para la calibración y análisis de la incertidumbre de modelos de cuencas.

El análisis de sensibilidad realizado para los 10 parámetros calibrados para cada una de las partes de la cuenca (Cuenca alta y Cuenca media-baja) muestra que, el orden de sensibilidad de los parámetros para la cuenca alta no es el mismo que para la cuenca media baja, lo que sugiere la importancia de la calibración multi-sitio.

Se necesitan estudios detallados a nivel de la cuenca sobre el aporte de sedimentos al caudal por parte de los fenómenos de remoción en masa, para así poder estimar eficientemente la producción futura de sedimentos en la cuenca mediante el modelo SWAT.

Usando proyecciones del modelo climático HadCM3 (escenarios A2 y A1B) para impulsar las simulaciones hidrológicas distribuidas, los resultados sugieren la posibilidad de cambios dramáticos en los caudales de la cuenca del río Pejibaye para el año 2030. En particular se espera un caudal de 24.7m^3 en la cuenca para el año 2030, bajo un escenario A1B, lo que representa una reducción del 25.3% en relación al año 2011. Bajo un escenario A2, se espera un caudal de 16.6m^3 en la cuenca para el año 2030, lo que representa una reducción del 49.7% en relación al año 2011.

Los parámetros hidrológicos analizados en este estudio se muestran más afectados por los efectos del cambio climático que por el cambio en el uso del suelo en la cuenca. Los diferentes modelos climáticos muestran una incertidumbre significativa en la proyección de los cambios del clima y sus impactos en la hidrología, con alteraciones muy significativas en producción agua (GCM HadCM3), lo que implica la necesidad de estudiar estos impactos utilizando otros modelos climáticos.

El acoplamiento entre los GCM y los modelos hidrológicos puede ser utilizado para estimar los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos en una cuenca.

Sin embargo, la excesiva dependencia de un solo GCM y un solo modelo hidrológico podría conducir a una planificación inadecuada del recurso hídrico dentro de una cuenca.

3.6 Recomendaciones

El uso de los modelos hidrológicos sin previa calibración conduce a la sobreestimación o subestimación considerable de las variables estudiadas. Mediante la calibración es posible lograr un ajuste aceptable entre los datos observados y los medidos. Aun cuando la naturaleza de este tipo de modelos los hace aplicables a cuencas que no cuentan con estaciones de aforo, los resultados muestran la conveniencia de ser calibrados con el mayor número de datos (caudal, sedimentos, etc.) de calidad confiable; pero bajo las condiciones de la naturaleza de la mayoría de las cuencas en nuestros países, es recomendable realizar estos procesos con los datos disponibles.

Se recomienda el uso del modelo SWAT en cuencas a escala local donde se tiene suficiente información y donde se pretende evaluar los impactos hidrológicos y contaminantes debido al uso del agua y de la tierra (Prochnow et al, 2008;. Schilling et al., 2008), para analizar las fuentes de contaminantes (Schilling y Wolter, 2009), cuantificar los impactos del cambio climático (Stone et al., 2001), evaluar el potencial de la energía hidroeléctrica (Kusre et al., 2010), estimar la erosión del suelo (Shen et al., 2009) y evaluar las mejores prácticas de manejo (Gassman et al., 2007).

3.7 Literatura citada

- Abbaspour, K.C., Johnson, C.A., van Genuchten, M.T., 2004. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone J.* 3 (4), 1340–1352.
- Abbaspour, K.C. et al., 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre- alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *J. Hydrol.* 333 (2–4), 413–430.
- Abbaspour, K.C., Faramarzi, M., Ghasemi, S., Yang, H., 2009. Assessing the impact of climate change on water resources in Iran. *Water Resour. Res.* 45, W10434.
- Abbaspour, K.C., 2011. User Manual for SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Analysis Programs. Eawag: Swiss Fed. Inst. of Aquat. Sci. and Tech- nol., Duebendorf, Switzerland, 103 pp.
- Aguilar, E; Peterson, T; Ramirez, O; Frutos, R; Retana, J; Solera, M. 2005. Changes in precipitation and temperature extremes in Central America and northern South America, 1961–2003. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 110.
- Arnold, J.G., Srinivasan, R., Muttiah, R.S., Williams, J.R., 1998. Large área hydrologic modeling and assessment – Part 1: Model development. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 34 (1), 73–89.
- Arnold, J.G., Fohrer, N., 2005. SWAT2000: Current capabilities and research opportunities in applied watershed modeling. *Hydrol Process.* 19 (3), 563–572.
- Bardossy, A., Singh, S.K., 2008. Robust estimation of hydrological model parameters. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 12 (6), 1273–1283.
- Benito, PR; Cuevas, J; de la Parra, RB; Prieto, F; del Barrio, JMG; Zavala, M. 2010. Land use change in a Mediterranean metropolitan region and its periphery: assessment of conservation policies through CORINE Land Cover data and Markov models. *Forest Systems* 19:315-328.
- Beven, K; Binley, A. 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrol Process.* 6 (3), 279–298.
- Brown, DG; Pijanowski, B; Duh, J. 2000. Modeling the relationships between land use and land cover on private lands in the Upper Midwest, USA. *Journal of Environmental Management* 59(4):247-263.
- Candela, L; Igel, Wv; Javier Elorza, F; Aronica, G. 2009. Impact assessment of combined climate and management scenarios on groundwater resources and associated wetland (Majorca, Spain). *Journal of Hydrology (Amsterdam)* 376(3/4):510-527.
- CATIE (Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza). 2011. Manejo agroecológico como ruta para lograr la sostenibilidad de fincas con café y ganadería / Editores: Cristóbal Villanueva, Claudia J. Sepúlveda L., Muhammad Ibrahim. Informe Técnico N° 387. Turrialba, Costa Rica. 91 p.
- CEPAL, (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2011. La economía del cambio climático en Centroamérica: Reporte técnico 2011. 419 p.
- Chien, H; Yeh, P; Knouft, J. 2013. Modeling the potential impacts of climate change on streamflow in agricultural watersheds of the Midwestern United States. *Journal of Hydrology (USA)*. 491. 73 – 88.

- Chu, TW; Shirmohammadi, A. 2004. Evaluation of the SWAT model's hydrology component in the piedmont physiographic region of Maryland. *Trans ASAE* 47(4):1057–1073.
- Eastman, JR. 2012. Guía para SIG y procesamiento de imágenes. Clark University 17: 321 p.
- Esquivel, MJ. 2005. Regeneración natural de árboles y arbustos en potreros activos en Muy Muy, Matagalpa, Nicaragua. Tesis Mag.Sc. Costa Rica, CATIE, Turrialba, CR. 142 p.
- Fan, F; Wang, Y; Wang, Z. 2008. Temporal and spatial change detecting (1998–2003) and predicting of land use and land cover in Core corridor of Pearl River Delta (China) by using TM and ETM+ images. *Environmental monitoring and assessment* 137(1):127- 147.
- FAO, (Food and Agriculture Organization of the United Nations)/Cooperazione italiana/UNEP). 2000. Land cover classification and user manual. FAO, Rome.179 p.
- Feldman, O; Korotkov, VN; Logofet, DO. 2005. The monoculture vs. rotation strategies in forestry: formalization and prediction by means of Markov-chain modelling. *Journal of Environmental Management* 77(2):111-121.
- Gallego, B. 2002. Estructura y composición de un paisaje fragmentado y su relación con especies arbóreas indicadoras en una zona de de bosque muy húmedo tropical, Costa Rica. Tesis Mag.Sc. Costa Rica, CATIE, Turrialba, CR. 103 p.
- Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H., Arnold, J.G., 2007. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. Center for Agricultural and Rural Development. Iowa State University. Working Paper 07-WP 443.
- Ghosh, S. and Mujumdar, P.P., 2008. Statistical downscaling of GCM simulations to streamflow using relevance vector machine. *Advances in Water Resources*, 31, 132–146.
- Gordon, VD; Nathan, ES; Apponi, AJ; McCarthy, MC; Thaddeus, P; Botschwina, P. 2000. Structures of the linear silicon carbides SiC₄ and SiC₆: isotopic substitution and Ab Initio theory. *J Chem Phys* 113:5311
- Gosain, A.K., Rao, S. and Basuray, D. 2006. Climate change impact assessment on hydrology of Indian river basins. *Current Science*, 90 (3), 346–353.
- Grayson, R., Blöschl, G. (Eds.), 2000. *Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modeling*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 355–367.
- Hay, L.E., Markstrom, S.L., Ward-Garrison, C., 2011. Watershed-scale response to climate change through the 21st century for selected basins across the United States. *Earth Interactions* 15, 1–37.
- Heuvelmans, G., Muys, B. and Feyen, J., 2004. Evaluation of hydrological model parameter transferability for simulating the impact of land use on catchment hydrology. *Physics and Chemistry of the Earth*, 29, 739–747.
- Heuvelmans, G; Garcia-Qujano, JF; Muys, B; Feyen, J; Coppin, P. 2005. Modelling the water balance with SWAT as part of the land use impact evaluation in a life cycle study of CO₂ emission reduction scenarios. *Hydrological Processes* 19(3):729-748.
- ICE (Instituto Costarricense de Electricidad). 2005. Plan de manejo integral de la cuenca del río Reventazón. 271p.
- ICE. 2009. La importancia del manejo de la cuenca el Río reventazón. Unidad de Manejo de Cuencas. Biblioteca ICE. CR. (En línea). Consultado el 30 de Enero de 2013. Disponible en http://www.grupoice.com/esp/ele/manejo_cuencas/biblio/folletos/importan.html

- IMN, (Instituto Meteorológico Nacional). 2008. Clima, variabilidad y cambio climático en Costa Rica. Segunda Comunicación Nacional, Comité Regional Nacional de Recursos Hidráulicos. San José, CR p. 72 p.
- IMN. 2012. Escenarios De Cambio Climatico Regionalizados Para Costa Rica. Departamento de Climatología e Investigaciones Aplicadas Instituto Meteorológico Nacional. Ministerio del Ambiente, Energía y Telecomunicaciones (MINAET). San José, Costa Rica. 1060 p.
- Imbach, P; Molina, L; Locatelli, B; Corrales, L; 2008. Vulnerabilidad de los servicios ecosistémicos hidrológicos al cambio climático en Mesoamérica. CATIE, Turrialba, Costa Rica. Serie técnica. Manual Técnico/ CATIE; no. 99. 21 - 27 p.
- Imbach, P; Molina, L; Locatelli, B; Roupsard, O; Mahe, G; Neilson, R; Corrales, L; Scholze, M; Ciais, P. 2011, Modeling Potential Equilibrium States of Vegetation and Terrestrial Water Cycle of Mesoamerica under Climate Change Scenarios. Climate Change Program, CATIE, Cartago, Costa Rica. 17 p.
- INEC. 2011. Instituto Nacional de Estadística y Censos de Costa Rica. Censo Poblacional 2011. CR. (En línea). Consultado el 16 de Marzo de 2013. Disponible en <http://www.inec.go.cr>
- IPCC (Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático). 2007a. Cambio Climático. Base de las ciencias físicas. Resumen para responsables de políticas. Resumen Técnico. Preguntas frecuentes. Contribución del Grupo de Trabajo 1 al Cuarto Informe de Evaluación. OMM-UNEP. 153 p.
- IPCC. 2007b. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth. 345 p.
- Jiménez, O; Fariás, H; Rodríguez, C. 2005. Procesos de sedimentación en embalses en ambientes tropicales. Estudios de casos en Costa Rica y República Dominicana. Ingeniería del Agua. Vol. 12. 16 p.
- Jones RG, Noguer M, Hassell DC, Hudson D, Wilson SS, Jenkins GJ, Mitchell JFB (2004) Generating high resolution climate change scenarios using PRECIS. Met Office Hadley Centre, Exeter, 40pp
- Juckem, PF; Hunt, RJ; Anderson, MP; Robertson, DM. 2008. Effects of climate and land management change on streamflow in the driftless area of Wisconsin. Journal of Hydrology (Amsterdam) 355(1/4):123-130.
- Kalin, L; Hantush, MM. 2006. Hydrologic modeling of an eastern Pennsylvania watershed with NEXRAD and rain gauge data. Journal of Hydrologic Engineering 11:555.
- Kamusoko, C; Oono, K; Nakazawa, A; Wada, Y; Nakada, R; Hosokawa, T; Tomimura, S; Furuya, T; Iwata, A; Moriike, H. 2011. Spatial Simulation Modelling of Future Forest Cover Change Scenarios in Luangprabang Province, Lao PDR. Forests 2(3):707-729.
- Kuczera, G., Parent, E., 1998. Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: the Metropolis algorithm. J. Hydrol. 211 (1-4), 69-85.
- Kusre, B.C., Baruah, D.C., Bordoloi, P.K., Patra, S.C., 2010. Assesment of hydropower potential using GIS and hydrological modeling technique in Kopili River basin in Assam (India). Appl. Energy 87, 298 - 309.
- Lenhart, T; Eckhardt, K; Fohrer, N; Frede, HG. 2002. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. Phys Chem Earth 27:645-654.

- Li, Z; Liu, W; Zhang, X; Zheng, F. 2009. Impacts of land use change and climate variability on hydrology in an agricultural catchment on the Loess Plateau of China. *Journal of Hydrology (Amsterdam)* 377(1/2):35-42.
- Mora, I. 1987. Evaluación de la pérdida de suelo mediante la ecuación universal (eups): aplicación para definir acciones de manejo en la cuenca del río pejibaye, verwibnte atlantica, Costa Rica. CATIE, Cartago, Costa Rica. 133 p.
- Nash, JE; Sutcliffe, JV. 1970. River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles. *J Hydrol* 10(3):282–290
- Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry J, Srinivasan R, Williams JR. 2002. Soil and Water Assessment Tool User Manual. , Texas Agricultural Experiment Station. College Station, TWRI TR-192
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Srinivasan, R., Williams, J.R., 2005a. Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation. Verison 2005. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Sataion, Temple, Texas.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., 2005b. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2005. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Sataion, Temple, Texas.
- Notter, B; MacMillan, L; Viviroli, D; Weingartner, R; Liniger, HP. 2007. Impacts of environmental change on water resources in the Mt. Kenya region. *Journal of Hydrology (Amsterdam)* 343(3/4):266-278.
- Ozah, AP; Dami, A; Adesina, FA. 2012. A Deterministic Cellular Automata Model for Simulating Rural Land Use Dynamics: A Case Study of Lake Chad Basin. *Journal of Earth Science and Engineering* 2(1):22-34.
- Paegelow, M. y Camacho Olmedo, M.T. (2005): Possibilities and limits of prospective GIS land cover modeling – a compared case study: Garrotxes (France) and Alta Alpujarra Granadina (Spain). *International Journal of Geographical Information Science*; vol. 19, n° 6; pp. 697-722.
- PEZO, D.; IBRAHIM, M. 1996. Sistemas silvopastoriles, una opción para el uso sostenible de la tierra en sistemas ganaderos. In Pastoreo intensivo en las zonas tropicales. I Foro Internacional (7 al 9 de Noviembre). FIRA/BANCO DE MEXICO. Veracruz, México. 35 p.
- Prochnow, S.J., White, J.D., Scott, T., Filstrup, C.D., 2008. Multi-scenario simulation analysis in prioritizing management options for an impacted watershed system. *Ecohydrology Hydrobiology* 8, 3e15.
- Programa de Reducción de la Vulnerabilidad y Degradación Ambiental, PREVDA. 2008. Plan de cuenca del río Reventazón - Parismina. San José, Costa Rica. 184p.
- Programa de Investigación y Desarrollo Urbano Sostenible, ProDUS. 2011. Balance Hídrico en las subcuencas de las partes alta y media del río Reventazón. COMCURE (Comisión para el ordenamiento de la cuenca alta del río Reventazón). Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica. 550p.
- Roots, EF. 1989. Climate change: high-latitude regions. *Climatic Change* 15 (1), 223–253.
- Schilling, K.E., Jha, M.K., Zhang, Y.K., Gassman, P.W., Wolter, C.F., 2008. Impact of land use and land cover change on the water balance of a large agricultural watershed: historical effects and future directions. *Water. Resour. Res.* 44, 1e12.
- Schilling, K.E., Wolter, C.F., 2009. Modeling nitrate-nitrogen load reduction strategies for the Des Moines River, Iowa using SWAT. *J. Environ. Manage.* 44, 671e682.

- Schuol, J; Abbaspour, KC; Srinivasan, R; Yang, H. 2008. Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model. *J Hydrol* 352(1–2):30–49.
- Schuol, J., K. C. Abbaspour, R. Sarinivasan, and H. Yang (2008a), Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model, *J. Hydrol.*, 352, 30– 49, doi:10.1016/j.jhydrol. 2007.12.025.
- Schuol, J., K. C. Abbaspour, R. Srinivasan, and H. Yang (2008b), Modelling blue and green water availability in Africa at monthly intervals and subbasin level, *Water Resour. Res.*, 44, W07406, doi:10.1029/ 2007WR006609.
- Shen, Z.Y., Gong, Y.W., Li, Y.H., Hong, Q., Xu, L., Liu, R.M., 2009. A comparison of WEPP and SWAT for modeling soil erosion of the Zhangjiachong watershed in the three Gorges reservoir area. *Ag Water Mgmt* 96, 1435e1442.
- Sivakumar, B., 2004. Dominant processes concept in hydrology: moving forward. *Hydrol. Process.* 18 (12), 2349–2353.
- Sivakumar, B., 2008. Dominant processes concept, model simplification and classification framework in catchment hydrology. *Stoch. Env. Res. Risk Assess.* 22 (6), 737–748.
- Srinivasan, R; Arnold, JG. 1994. Integration of a basin-scale water quality model with GIS. *Water Resour Bull Am Water Resour Assoc* 30(3):453–46.
- Stone, M.C., Hotchkiss, R.H., Hubbard, C.M., Fontaine, T.A., Mearns, L.O., Arnold, J.G., 2001. Impacts of climate change on Missouri River basin water yield. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 37, 1119e1129.
- Takken, I. et al., 1999. Spatial evaluation of a physically-based distributed erosion model (LISEM). *Catena* 37 (3–4), 431–447
- Tang, J; Wang, L; Yao, Z. 2007. Spatio-temporal urban landscape change analysis using the Markov chain model and a modified genetic algorithm. *International Journal of Remote Sensing* 28(15):3255-3271.
- The Nature Conservancy, TNC. 2009. Climate wizard (en línea). Consultado 17 ago. 2013. Disponible en <http://www.climatewizard.org/>
- Van Griensven, A., Meixner, T., 2006. Methods to quantify and identify the sources of uncertainty for river basin water quality models. *Water Sci. Technol.* 53 (1), 51–59.
- Velásquez, RA. 2005. Selectividad animal de forrajes herbáceos y leñosos en pasturas naturalizadas en función de épocas, manejo y condición de paisaje en Muy Muy, Nicaragua. Tesis Mag.Sc. Costa Rica CATIE, Turrialba, CR. 77 p.
- Vigerstol, K; Aukema, J. 2011. A comparison of tools for modeling freshwater ecosystem services. *Journal of Environmental Management.* 92 (2011), 2403 – 2409.
- Virgilio E.M. 2011. Alcances de la implementación participativa con familias cafetaleras: sistematización de casos en Pejibaye de Jiménez y Rivas de Pérez Zeledón en Costa Rica. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 53 p.
- White, KL; Chaubey, I. 2005. Sensitivity analysis, calibration, and validations for a multisite and multivariable SWAT model. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 41(5):1077-1089.
- Wilby, R.L. and Harris, I., 2006. A framework for assessing uncertainties in climate change impacts: low-flow scenarios for the River Thames, UK. *Water Resources Research*, 42, W02419. doi:10.1029/2005WR004065.

- Yang, J., Reichert, P., Abbaspour, K.C., Xia, J., Yang, H., 2008. Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe Basin in China. *J. Hydrol.* 358 (1–2), 1-23.
- Zhang, X., Srinivasan, R., Van Liew, M., 2008. Multi-site calibration of the SWAT model for hydrologic modeling. *Trans. ASABE* 51 (6), 2039–2049.
- Zhang, X; Yang, Q; Chen, Y. 2011. Coupling of hydrological and ecological process: An approach to implement the sustainable water resources management in Hanjiang watershed. 2011 International Symposium on Water Resource and Environmental Protection (ISWREP), 2: 1078–1083.