

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN

PROGRAMA DE POSGRADO

**Dinámica hídrica bajo condiciones climáticas cambiantes en la subcuenca del río
Tempisquito, cuenca del Tempisque, Guanacaste, Costa Rica**

**Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de
Posgrado como requisito para optar al grado de**

MAGISTER SCIENTIAE

en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas

DORIAN CARVAJAL VANEGAS

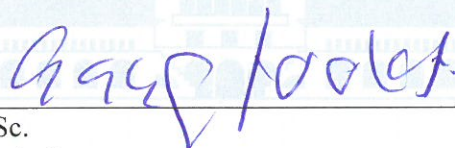
Turrialba, Costa Rica

2017

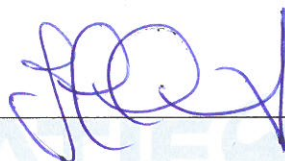
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y el Programa de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

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

FIRMANTES:

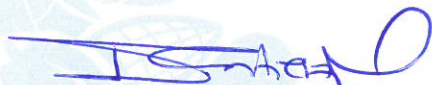


Ney Ríos, M.Sc.
Codirector de tesis

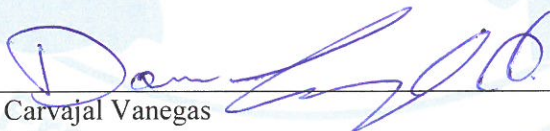


Julio Calvo, Ph.D.
Codirector de tesis

Juan C. Zamora, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Isabel A. Gutiérrez-Montes, Ph.D.
Decana Programa de Posgrado



Dorian Carvajal Vanegas
Candidato

DEDICATORIA

A mis padres por ser el pilar fundamental en mi educación
y en la vida, gracias por su incondicional apoyo.

A Carolina por su apoyo todos estos años.

AGRADECIMIENTOS

A mi profesor asesor Ney Ríos por toda su ayuda, paciencia, conocimientos y amistad brindaba. Gracias por enseñarme a ser paciente a la hora de modelar.

A mi profesor y mentor Julio Calvo-Alvarado por su confianza y amistad de hace ya muchos años.

A Juan Carlos Zamora por su colaboración y excelente guía. Al profesor William Watler por su colaboración y consejos.

Al ingeniero David Sánchez por su ayuda en los perfiles de suelos y a las ingenieras Carolina Tenorio y María Rodríguez en la elaboración del documento.

Al fondo Henry A. Wallace Legacy Scholar con apoyo económico del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y al Fondo CATIE por brindarme la beca para realizar mis estudios de maestría. También quiero agradecer al Comité de Becas del Instituto Tecnológico de Costa Rica por el tiempo asignado para mis estudios.

Esta tesis es parte de la colaboración científica entre el Instituto Tecnológico de Costa Rica y el Stroud Water Research Center como parte del proyecto de investigación Long Term Research in Environmental Biology (LTREB): Dynamics of Stream Ecosystem Responses across Gradients of Reforestation and Changing Climate in a Tropical Dry Forest, patrocinado por US National Science Foundation (NSF DEB 05-16516), la Vicerrectoría de Investigación y Extensión y el Programa de Investigación en Recursos Naturales del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Se reconoce el apoyo adicional del TROPI-DRY Research Network apoyado por el Inter-American Institute for Global Change Research (IAI CRN3025), con fondos de la US National Science Foundation (grant GEO-1128040). Expreso mi gratitud al Área de Conservación Guanacaste y al personal de campo del Stroud Water Research Center (Rafael Morales y Cristian Collado), también a los compañeros César Jiménez, Óscar Arias, Juan Carlos Solano y Ana Julieta Calvo.

CONTENIDO

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS.....	IV
RESUMEN	XI
ABSTRACT.....	XI
CAPÍTULO I.	1
1.1 INTRODUCCIÓN Y SÍNTESIS GENERAL DE LA TESIS.....	1
1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA.....	2
1.3 OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	3
1.3.1 Objetivo general	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.3.3 Preguntas de investigación	3
2. MARCO REFERENCIAL	4
2.1 Ciclo hidrológico	4
2.2 Servicios hidrológicos	5
2.3 Balance hídrico.....	5
2.3.1 Precipitación.....	5
2.3.2 Escorrentía	6
2.3.3 Evapotranspiración	6
2.3.4 Evapotranspiración potencial.....	6
2.3.5 Infiltración	6
2.3.6 Erosión.....	7
2.4 Modelos hidrológicos.....	9
2.5 Modelo SWAT.....	10
2.5.1 Calibración del modelo SWAT	11
2.6 Sistemas de clasificación climática.....	11
2.6.1 Sistema de zonas de vida de Holdridge.....	11
2.7 Cambio climático	14
2.8 Escenarios de clima futuro.....	15
2.9 Efecto del cambio climático en las zonas de vida	15
3. PRINCIPALES RESULTADOS Y CONCLUSIONES	19
4. LITERATURA CITADA.....	20
CAPÍTULO II	26
ARTÍCULO I. Línea base de producción de agua y sedimentos en la subcuenca del río Tempisquito	26
RESUMEN	26

1. INTRODUCCIÓN	27
2. MÉTODOS Y MATERIALES	28
2.1 Área de estudio	28
2.2 Línea base de la producción de agua y erosión	30
2.3 Delimitación de la subcuenca	32
2.4 Datos de entrada del modelo SWAT	33
2.5 Variables por defecto a modificar y periodo de calentamiento	36
2.6 Calibración	36
3. RESULTADOS	39
3.1. Simulación inicial	39
3.2 Calibración	40
3.3 Producción de agua	42
3.4 Erosión	44
3.5 Caudal y descarga de sedimento mensual	45
4. DISCUSIÓN	45
4.1 Calibración del modelo	45
4.2 Producción de agua y caudales	47
4.3 Erosión y sedimentos	47
5. CONCLUSIONES	49
6. RECOMENDACIONES	49
7. LITERATURA CITADA	50
ARTÍCULO II. Producción de agua y sedimentos bajo diferentes escenarios de zonas de vida y cambio climático en la subcuenca del río Tempisquito	55
RESUMEN	55
ABSTRACT	55
1. INTRODUCCIÓN	57
2. MÉTODOS Y MATERIALES	58
2.1 Modelos de circulación general	58
2.2 Anomalías de precipitación y temperatura	59
2.3 Sistema de zonas de vida de Holdridge	59
2.3.1 Determinación de la biotemperatura y precipitación anual	59
2.3.2 Reducción de escala y delimitación de las zonas de vida	60
2.4 Incorporación de insumos al modelo calibrado de SWAT	61
3. RESULTADOS	63
3.1 Anomalías de temperatura y precipitación al año 2070	63
3.2 Zonas de vida de Holdridge al año 2070	63
3.2 Producción de agua al año 2070	65
3.3 Erosión al año 2070	66
3.4 Distribución mensual del caudal y sedimentos	67

4. DISCUSIÓN.....	69
4.1 Zonas de vida de Holdridge	69
4.2 Producción de agua futura.....	70
4.3 Producción futura de erosión y sedimentos	71
5. CONCLUSIONES.....	72
6. RECOMENDACIONES.....	73
7. LITERATURA CITADA.....	74

LISTA DE CUADROS

Cuadro 1. Ecuaciones para medir la pérdida de suelo por erosión y sus principales diferencias.....	7
Cuadro 2. Principales cambios atmosféricos observados según la IPCC en su quinto informe de evaluación	14
Cuadro 3. Estudios de caso donde se utiliza el sistema de zonas de vida de Holdridge para modelar cambios en la vegetación	16
Cuadro 4. Componentes del balance hídrico, producción de agua y erosión hídrica durante el periodo 2008-2013 en la subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica	19
Cuadro 5. Componentes del balance hídrico, producción de agua y erosión hídrica bajo condiciones de clima futuro (2070), en la subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica.....	19
Cuadro 6. Parámetros fisicoquímicos de suelo requeridos por el modelo SWAT.....	33
Cuadro 7. Parámetros iniciales y sus rangos para la calibración de SWAT-CUP en los puntos de aforo de la subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica	38
Cuadro 8. Parámetros utilizados para la calibración del caudal en el modelo SWAT.....	41
Cuadro 9. Estadísticos de ajuste para los puntos de aforo de las microcuencas Maritza (microcuenca 2) y Tempiquisto-Orosí (microcuenca 10), subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica.....	41
Cuadro 10. Modelos de circulación general utilizados para predecir el clima futuro y su ranking para reproducir las condiciones climáticas de América Central	58
Cuadro 11. Balance hídrico y erosión para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 según cinco modelos de circulación general al año 2070, subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica.....	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representación simplificada del ciclo hidrológico.....	4
Figura 2. Diagrama de zonas de vida de Holdridge.....	12
Figura 3. Posiciones aproximadas de las regiones latitudinales y fajas altitudinales en el sistema zonas de vida de Holdridge.....	14
Figura 4. Ubicación de la subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica.....	29
Figura 5. Panorámica de la subcuenca del río Tempisquito con los volcanes Orosí y Cacao al fondo.....	29
Figura 6. Flujograma que representa la modelación en SWAT para la línea base de producción de agua y erosión en la subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica.....	32
Figura 7. Delimitación de la subcuenca del río Tempisquito con las extensiones QSWAT 1.4 y ArcSWAT 2012. Guanacaste, Costa Rica.....	33
Figura 8. Datos de entrada del modelo SWAT para la delimitación de las microcuencas, creación de HRUs y ubicación de estaciones meteorológicas: (a) modelo de elevación digital, (b) mapa de suelos, (c) mapa de cobertura y (d) estaciones meteorológicas utilizadas y puntos de aforo, subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica.....	35
Figura 9. Componentes del balance hídrico según la simulación inicial de QSWAT, subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica.....	39
Figura 10. Caudal estimado y observado en los puntos de aforo ubicados a la salida de las microcuencas Maritza (2) y Tempisquito-Orosí (10), subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica.....	40
Figura 11. Caudal simulado, observado y banda de predicción PPU95% para la microcuenca Tempisquito-Orosí, subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica.....	42
Figura 12. Producción de agua y sus componentes en la subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica.....	43
Figura 13. Pérdidas de suelo por erosión en la subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica.....	44
Figura 14. Caudal medio mensual y carga de sedimentos mensuales a la salida de la subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica.....	45
Figura 15. Reducción de escala de las capas de precipitación mediante la formación de centroides con información de cada pixel y su posterior interpolación espacial por el método de Kriging, subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica.....	60
Figura 16. Flujograma que representa la modelación en SWAT calibrada según escenarios futuros de producción de agua y erosión para la subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica.....	62
Figura 17. Anomalías de temperatura y precipitación de cinco modelos de circulación general bajo dos escenarios de emisiones en el área de estudio de la subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica.....	63

Figura 18. Zonas de vida de Holdridge al año 2070 para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 según cinco modelos de circulación general en la subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica.....	64
Figura 19. Producción de agua por microcuenca al año 2070 para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 según cinco modelos de circulación general, subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica.....	66
Figura 20. Erosión por microcuenca al año 2070 para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 según cinco modelos de circulación general, subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica.....	67
Figura 21. Caudal y sedimento mensual esperados en el año 2070 para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 según 5 modelos de circulación general, subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica.....	68

LISTA DE ACRÓNIMOS, ABREVIATURAS Y UNIDADES

ACG	Área de Conservación Guanacaste
ArcSWAT	Interfase modelo hidrológico SWAT para Arc Gis
CATIE	Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza
FFCB	Almacenamiento inicial de agua inicial en el suelo
KGE	Coefficiente de eficiencia de Kling-Gupta
PBIAS	Porcentaje de sesgo
MCG	Modelo de circulación general
NYSKIP	Periodo de calentamiento en años
RCP	Senda representativa de concentración
MED	Modelo de elevación digital
NSE	Coefficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe
QSWAT	Interfase modelo hidrológico SWAT para QGIS
SWAT	Soil and Water Assessment Tool
SWAT-CUP	SWAT Calibration and Uncertainty Programs
SWRC	Stroud Water Research Center
SUFI-2	Sequential Uncertainty Fitting version 2
PNG	Parque Nacional Guanacaste
R ²	Coefficiente de determinación
Ha	Hectárea
t	Tonelada
m ³	Metro cúbico
Km ²	Kilómetro cuadrado
s	Segundo
Q	Caudal
mm	milímetros
%	Porcentaje

RESUMEN

El estudio se realizó en la subcuenca del río Tempisquito, ubicado en la parte alta de la cuenca del río Tempisque, Guanacaste, Costa Rica. La subcuenca tiene una extensión de 14,29 km² y drena sus aguas al golfo de Nicoya. El objetivo fue analizar el comportamiento del recurso hídrico a nivel de zonas de vida de Holdridge bajo escenarios de clima actual y futuro. El modelo hidrológico SWAT, en su interface de QGIS (QSWAT), es empleado para evaluar el comportamiento de producción de agua y erosión. La calibración del modelo es realizada con el programa SWAT-CUP. Para el clima futuro se consideran dos escenarios de emisiones RCP 4.5 y RCP 8.5 al 2070 según 5 modelos de circulación general. El proceso de calibración resultó en un muy buen modelo (NSE 0,70). Los resultados indican que para el año 2070 se espera una disminución de área y desplazamiento en algunas zonas de vida actuales, mientras que en otras su área aumentará. La producción de agua futura variará entre -37,07% y 69,75% con respecto al periodo base (2008-2011). Se proyecta una variación en la erosión media al año 2070 de entre -47,20% y 228,50%. La dinámica de la redistribución de las zonas de vida vinculadas al cambio del clima afectará la producción de agua, caudales y sedimentos.

Palabras clave: Modelo SWAT, zonas de vida de Holdridge, producción de agua, erosión, producción de sedimentos.

ABSTRACT

The study was conducted in the Tempisquito watershed, located in the upper part of the Tempisque river basin, Guanacaste, Costa Rica. The watershed covers an area of 14.29 km² and drains its waters to the Gulf of Nicoya. The objective is to analyze the behavior of the water resource at the level of Life Zones, according to the Holdridge classification, in the watershed of the Tempisquito River under scenarios of current climate and future climate. The SWAT hydrological model, in its QGIS interface (QSWAT), is used to evaluate the behavior of water yield and erosion. The calibration of the model is carried out with the SWAT-CUP program. For the future climate scenarios, two RCP's 4.5 and RCP 8.5 to 2070 according to 5 general circulation models. The calibration process allows to achieve a very good model (NSE 0.70). The results indicate that by the year 2070 a decrease and displacement is expected in the current life zones. Future water yield will vary between -37.07% and 69.75% with respect to the base period (2008-2011). On the average in year 2070 the soil erosion variation is projected between -47.20% and 228.50%. It is concluded that the impact of climate change scenarios in the redistribution of life zones will affect the production of water, flows and sediments.

Key word: SWAT model, Holdridge life zones, water yield, erosion, sediment yield

CAPÍTULO I.

1.1 INTRODUCCIÓN Y SÍNTESIS GENERAL DE LA TESIS

Durante la segunda mitad del siglo XX, Costa Rica sufrió un acelerado proceso de deforestación donde se perdió alrededor de un 50% de cobertura entre los años 1940 y 1983. En la provincia de Guanacaste los bosques fueron eliminados casi en su totalidad debido a las políticas de colonización de tierras y a la expansión de la superficie de pastos para producción ganadera. Las zonas de vida más afectadas por estos procesos de deforestación fueron el bosque seco tropical y el bosque húmedo tropical; solamente las zonas con gran pluviosidad y difícil acceso se mantuvieron con poco disturbio (Sader y Joyce 1988; Sánchez-Azofeifa *et al.* 2001; Calvo-Alvarado *et al.* 2009). Es hasta en las décadas de 1970 y 1980 que se da un avance en las políticas ambientales y de gobierno se inicia la recuperación de la cobertura boscosa en muchas partes del país, sobre todo en la provincia de Guanacaste (Janzen 1986; Calvo 1990; Arroyo *et al.* 2005; Calvo-Alvarado *et al.* 2009). Para poder explicar esta transición hacia bosque, que ha ocurrido desde los años 1980, es necesario entender complejos procesos de globalización (Allen y Padgett Vásquez 2017).

Un ejemplo de procesos de recuperación de cobertura boscosa en el país es el Parque Nacional Guanacaste (PNG), el cual fue creado en 1991 y tiene una extensión de 344,7 km². En él se encuentran cinco zonas de vida y dos transiciones según el sistema de zonas de vida de Holdridge (Holdridge 1964). La hidrología del PNG ha sido poco estudiada: Jiménez *et al.* (2015), estimaron el desempeño de dos modelos hidrológicos en la predicción de flujos diarios bajo un escenario de cambio climático. Por su parte Newbold *et al.* (1995), estudiaron la química del agua en seis arroyos dentro del PNG. Bajo este contexto es necesario un mayor entendimiento de las dinámicas entre la regeneración del bosque y los flujos de agua. Además, comprender cómo el cambio climático puede afectar las zonas de vida, desplazando los pisos altitudinales o provincias de humedad (Jiménez *et al.* 2010; Khatun *et al.* 2013), lo cual tiene un efecto en la vegetación existente y por consiguiente en el ciclo hidrológico.

Al recuperarse un ecosistema boscoso por regeneración, se esperaría una mayor regulación del ciclo hidrológico (Calder 2002; Webb *et al.* 2012), en algunos casos un mejoramiento en la calidad del agua, menores tasas de erosión y una disminución de la magnitud en los caudales pico, entre otros (Madej 2001; Brauman *et al.* 2007; Iroumé *et al.* 2010). Sin embargo, estos efectos y beneficios de la cobertura forestal sobre el recurso hídrico han sido largamente cuestionados por la comunidad científica (Calder 2004) y el escenario es mucho más complejo (Stratford *et al.* 2007), de ahí la necesidad de monitorear los cambios de los componentes del ciclo hidrológico ante una variación en la cobertura forestal.

Una manera de poder predecir esas variaciones es mediante el uso de modelos hidrológicos (Birkel *et al.* 2012; Komatsu *et al.* 2012; Abbaspour *et al.* 2015), los cuales son de gran ayuda

para poder estimar los diferentes componentes del ciclo hidrológico, así como la erosión y contaminación. Estos modelos, además, pueden identificar consecuencias de variaciones climáticas, escenarios futuros de cambio climático o cambios de cobertura vegetal (Xu 1999). Un modelo usado en cuencas hidrográficas es Soil and Water Assessment Tool (SWAT), modelo semi-distribuido que requiere un gran número de parámetros de entrada y fue desarrollado para evaluar y predecir el impacto de diferentes prácticas de manejo sobre la producción de agua y otras variables como sedimentos, evapotranspiración y balances de nutrientes entre otros (Arnold *et al.* 2012).

1.2 JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

Según García (1999), en la cuenca del río Tempisque se produce más del 40% de la producción nacional de arroz y caña de azúcar. Aparte del riego, esta cuenca provee agua para consumo humano, generación eléctrica y pesca. Por otra parte, existen funciones ecológicas que cumplen tanto el río Tempisque y sus tributarios como el transporte y reciclaje de nutrientes, recarga de aguas subterráneas, hábitat a la vida silvestre, entre otros (Baish 2001; Murcia *et al.* 2012). Al regenerarse la cobertura forestal, se espera que las funciones ecológicas mejoren o se estabilicen.

Por otra parte, en la cuenca del río Tempisque desde hace varias décadas se han hecho extracciones de agua para diferentes usos como riego, agroindustria y consumo humano (Guzmán y Calvo-Alvarado 2012). Esto afecta la dinámica natural del río, sobre todo durante la estación seca, cuando se dan bajas condiciones de caudal y extracciones de agua por concesiones que afectan el hábitat de especies de fauna presentes en el río (Jiménez *et al.* 2005; Calvo-Alvarado *et al.* 2008).

Otro factor que puede tener repercusiones en el río Tempisque es el cambio climático. Según varios escenarios, se espera un aumento en las temperaturas y una disminución en la precipitación sobre todo en la vertiente pacífica de Centroamérica, condiciones que afectarían la dinámica hídrica en la cuenca (Giorgi 2006; Mauer *et al.* 2009). Además, se prevén cambios en las zonas de vida presentes. Khatun *et al.* (2013), mencionan que, bajo tres escenarios de cambio climático, las zonas de vida de Costa Rica pasarán de 11 a solamente 9, lo que producirá disminución de heterogeneidad de los ecosistemas.

Bajo este contexto, analizar la dinámica hídrica bajo condiciones climáticas cambiantes en la cuenca es sumamente relevante ya que puede ser usado en la toma de decisiones sobre concesiones actuales de agua, debido a que el estudio permitirá conocer la dinámica hídrica bajo un panorama de cambio climático, donde se vean afectadas condiciones climáticas, las zonas de vida y su vegetación. La metodología puede ser replicada en otras cuencas con características similares

1.3 OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1.3.1 Objetivo general

Analizar el comportamiento del recurso hídrico a nivel de zonas de vida de Holdridge actuales y futuras potenciales en la subcuenca del río Tempisquito bajo escenarios de cambio climático.

1.3.2 Objetivos específicos

- Estimar la producción de agua y erosión en la subcuenca del río Tempisquito según la cobertura de la tierra actual.
- Generar los cambios geográficos de las zonas de vida bajo escenarios de clima futuro y estimar su efecto en la producción de flujos de agua y erosión.

1.3.3 Preguntas de investigación

Objetivos específicos	Preguntas de investigación
Obj. 1 Estimar la producción de agua y erosión en la subcuenca del río Tempisquito según la cobertura de la tierra actual.	¿Cuál es la línea base de producción de agua y erosión en la subcuenca del río Tempisquito?
Obj. 2 Generar los cambios geográficos de las zonas de vida bajo escenarios de clima futuro y estimar su efecto en la producción de agua y erosión.	¿Qué efectos tendrá el cambio climático en las zonas de vida presentes en la subcuenca del río Tempisquito? ¿Cuál es el efecto de las variaciones en la distribución geográfica de las zonas de vida con respecto a la producción de agua y erosión en la subcuenca del río Tempisquito?

2. MARCO REFERENCIAL

2.1 Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico se define como el grupo de cambios que sufre el agua tanto en estado como en forma; como cualquier ciclo no tiene principio ni fin (Villón 2004). Sin embargo, se puede decir que la radiación solar es el principal motor que mueve este ciclo, evaporando grandes cantidades de vapor de agua hacia la atmósfera (Pabón y Chaparro 2001).

Margulis (2016), menciona que el agua se encuentra en diferentes reservorios, y se mueve por medio de flujos. Algunos de estos flujos hidrológicos son la precipitación, evaporación, transpiración, infiltración, recarga y escorrentía. Según Villón (2004), los grandes cuerpos de agua se evaporan por acción de diferentes elementos como el sol o el viento; el vapor asciende a la atmósfera donde se enfría, se condensa y forma nubes. Estas nubes pueden producir precipitaciones que llegan a la superficie, una parte de esta precipitación es interceptada por la vegetación y regresa a la atmósfera por evaporación directa, siendo este un pequeño componente de la evapotranspiración (Cavelier y Vargas 2002; Carvajal-Vanegas y Calvo Alvarado 2012; Jiménez-Rodríguez y Calvo-Alvarado 2014). La parte de la precipitación que sí llega al suelo puede tomar varios caminos: escurrir superficialmente, sub-superficialmente como inter-flujo o recargar los acuíferos (Figura 1). Estos pueden almacenar el agua o liberarla como flujo base, la cual es parte de la escorrentía (Arnold *et al.* 1993; Margulis 2016)

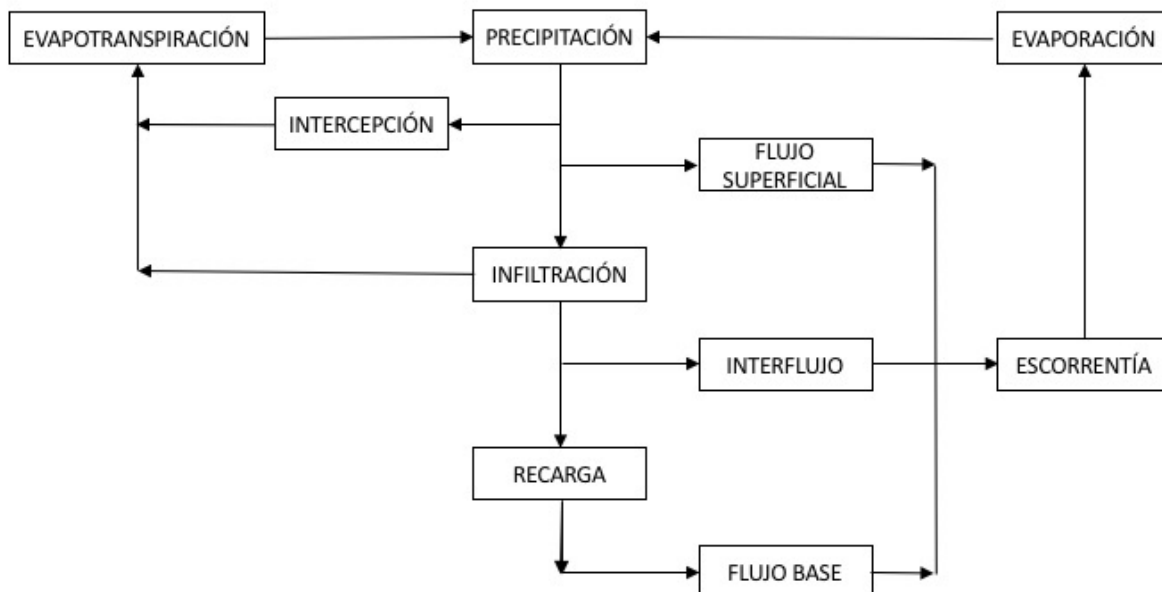


Figura 1. Representación simplificada del ciclo hidrológico Modificado de Freeze y Cherry (1979)

2.2 Servicios hidrológicos

Diversos procesos que ocurren en el ciclo hidrológico proveen servicios ecosistémicos a las personas. Entre estos servicios se encuentran los servicios hidrológicos, tales como la extracción y distribución de agua para diversos fines como consumo humano, agricultura, industria, etc. También hay servicios hídricos que se dan *in situ* como el uso de agua para generación hidroeléctrica, transporte, recreación y pesca.

Otros servicios se enfocan en la mitigación de daños por el agua como la reducción de inundaciones, salinización, intrusión de agua salina y sedimentación. Además, los recursos hídricos pueden brindar servicios espirituales o estéticos los cuales pueden ser religiosos, culturales o turísticos. Finalmente, existen servicios hídricos de soporte como el agua y nutrientes necesarios para diversos hábitats (Brauman *et al.* 2007; Brauman 2015).

2.3 Balance hídrico

Según Penman (1956), la precipitación es igual a la magnitud de las pérdidas dentro de una cuenca, las cuales se pueden separar tanto en pérdidas líquidas como en vapor. En términos sencillos, el balance hídrico en una cuenca se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$P = Q + ET \pm S$$

Donde :

P = precipitación

Q = escorrentía

ET = evapotranspiración

S = cambio en el almacenamiento de agua en el suelo

2.3.1 Precipitación

La precipitación es cualquier forma de humedad que emana de las nubes, la cual puede precipitar a la superficie en forma de lluvia, granizo, nieve y agua nieve (Villón 2004). La precipitación se forma a partir del agua que se encuentra en las nubes; esto puede ocurrir de dos maneras: 1) sí el aire es puro, la condensación de vapor de agua hacia gotas se dará solo cuando el aire se encuentre sobresaturado de humedad. 2) cuando en el aire existen partículas conocidas como aerosoles, las cuales sirven como núcleos de condensación para la formación de gotas de lluvia, aun cuando la atmósfera no esté sobresaturada (Shaw *et al.* 2010).

2.3.2 Escorrentía

Es el agua producto de la precipitación que escurre o circula sobre o bajo la superficie y que drena hacia el final de la cuenca. Este escurrimiento puede ser superficial, subsuperficial o subterráneo y depende de la intensidad y duración de la tormenta, humedad inicial del suelo, tasa de infiltración y el nivel freático, entre otros (Villón 2004; Margulis 2016).

2.3.3 Evapotranspiración

La evapotranspiración involucra cualquier proceso donde el agua que se encuentra en la superficie de la tierra pasa de estado líquido a gaseoso (Margulis 2016). La evapotranspiración es la suma de la transpiración de las hojas por medio de sus estomas y la evaporación del agua en superficies como el suelo, cuerpos de agua o del agua interceptada por las mismas plantas (Cavelier y Vargas 2002).

La medición de la evapotranspiración es sumamente difícil, por lo que se recurre a diversos métodos para estimar su valor. Entre estos métodos están los de balance de energía y micrometeorológicos (*eddy covariance*), métodos de balance de agua en el suelo (lisímetros) y métodos empíricos o semi-empíricos basados en datos meteorológicos (Allen *et al.* 1998). Algunos de estos métodos que usan información meteorológica son: Thornthwaite (Thornthwaite y Mather 1951), Hargreaves (Hargreaves y Samani 1985) y Penman-Monteith modificada por FAO (Allen *et al.* 1998).

2.3.4 Evapotranspiración potencial

Se define la evapotranspiración potencial como el agua que se pierde de la superficie en un sitio cubierto de vegetación y donde hay suficiente disponibilidad de agua en el suelo (Thornthwaite y Mather 1951; Calvo 1986; Trezza 2008). Entonces la evapotranspiración potencial depende únicamente del clima. Esta es una definición similar a la de evapotranspiración de referencia; sin embargo, no deben confundirse (Allen *et al.* 1998).

2.3.5 Infiltración

La infiltración es el proceso donde el agua penetra las capas superficiales del suelo, mientras que percolación es cuando el agua se mueve a través de las capas del subsuelo (Villón 2004). La infiltración depende de la textura del suelo; texturas gruesas tienen una mayor capacidad de infiltración que las texturas finas (Margulis 2016). La infiltración también tiene relación con la cobertura ya que la presencia de raíces, materia orgánica y porosidad producto de la vegetación mejora la infiltración de los suelos (Cavelier y Vargas 2002).

2.3.6 Erosión

Para determinar la pérdida de suelos por erosión existen diversos métodos; algunos utilizan parcelas donde se mide la escorrenría, otros simulan eventos lluviosos donde se controlan variables como cobertura y pendiente (Núñez 2010). Un método comúnmente utilizado para el cálculo de las pérdidas por erosión es el uso de la ecuación universal de pérdida de suelos (USLE, por sus siglas en inglés) (Wischmeier y Smith 1965). A partir de esta ecuación se han desarrollado versiones con mejoras (Cuadro 1), como la ecuación universal de pérdida de suelos revisada (RUSLE) y la ecuación universal de pérdida de suelos modificada (MUSLE).

Cuadro 1. Ecuaciones para medir la pérdida de suelo por erosión y sus principales diferencias

Modelo	Concepto	Diferencias	Estudios de caso / escala
USLE	<p>La ecuación universal de pérdida de suelos estima la tasa de erosión de suelo que se pierde debido a un conjunto de variables como precipitación, tipo de suelo, topografía, cobertura vegetal y prácticas de conservación de suelos (Wischmeier y Smith 1965, 1978).</p> <p>La ecuación es la siguiente:</p> $A = R * K * LS * C * P$ <p>Donde: A= pérdidas de suelo por unidad de área. R= factor de erosividad de la lluvia. K= factor de erodabilidad del suelo. LS= factor combinado de largo e inclinación de la pendiente. C= factor de cobertura y manejo. P=factor de prácticas de conservación de suelo. (Wischmeier y Smith 1978).</p>	<p>Los factores L y S son calculados con las siguientes fórmulas:</p> $L = \left(\frac{l}{22,1} \right)^m$ <p>s ≤ 1 m = 0,2 1 < s < 3 m = 0,3 3 < s < 5 m = 0,4 s ≥ 5 m = 0,5</p> $S = 0,0065s^2 + 0,045s + 0,065$ <p>Donde: l = longitud de la ladera en metros. s = pendiente de la ladera en %.</p> <p>(Yuste <i>et al.</i> 2005).</p>	<p>Evaluación de la erosión del suelo y su correlación con deslizamientos, utilizando GIS y sensores remotos en la isla Penang, Malasia (Pradhan <i>et al.</i> 2012), isla (285 km²).</p> <p>Modelo de estimación de carga de sedimentos en suspensión para Carolina del Norte usando USLE (Calvo y Gregory 1997).</p> <p>Evaluación del riesgo de erosión de suelo a nivel de cuenca, estudio de caso en la cuenca Chemoga, cuenca del Nilo Azul, Etiopía (Bewket y Teferi 2009), cuenca (346,9 km²).</p> <p>Evaluación de la erosión del suelo en una cuenca accidentada de la India Oriental usando la USLE, SIG y sensores remotos</p>

Modelo	Concepto	Diferencias	Estudios de caso / escala
			<p>(Dabral <i>et al.</i> 2008), cuenca (1556 km²).</p> <p>Predicción de sedimentos suspendidos en cuencas de Costa Rica. (Calvo-Alvarado 1998), 24 cuencas entre 12-400 km².</p>
RUSLE	<p>Al igual que la ecuación de USLE, la ecuación universal de pérdida de suelos revisada (RUSLE), es un modelo de erosión que estima las pérdidas promedio de erosión anual de suelo (Renard <i>et al.</i> 1997).</p> <p>La RUSLE es una actualización de la USLE (Renard <i>et al.</i> 1997).</p>	<p>Una diferencia entre RUSLE y USLE es el cálculo de los factores L y S, como se muestra en las siguientes fórmulas:</p> $L = \left(\frac{l}{22,1}\right)^m$ $m = \frac{\beta}{\beta + 1}$ $\beta = \frac{\text{sen } \theta / 0,0896}{3 * (\text{sen } \theta)^{0,8} + 0,56}$ <p>S=10,8*sen θ+0.03 s<9% S=16,8*sen θ-0.05 s>9% (Yuste <i>et al.</i> 2005).</p>	<p>Evaluación de erosión del suelo a escala de cuenca de gran tamaño utilizando RUSLE y SIG: estudio de caso en la meseta de Loess, China (Fu <i>et al.</i> 2005), cuenca (7725 km²).</p> <p>Predicción espacial del riesgo de erosión del suelo por teledetección, SIG y el enfoque RUSLE: Un estudio de caso en la cuenca del río Siruvani, valle Attapady, Kerala, India (Prasannakumar <i>et al.</i> 2011), cuenca (205,5 km²).</p> <p>Mapeo regional de riesgo de erosión del suelo usando RUSLE, SIG y sensores remotos: un estudio de caso en la cuenca Miyun, Norte de China (Chen <i>et al.</i> 2010), cuenca (15788 km²).</p>
MUSLE	<p>En la ecuación universal de pérdida de suelos modificada (MUSLE) el factor R que representa la erosividad de la lluvia y que se relaciona a su</p>	<p>La diferencia entre MUSLE y USLE es que la primera puede calcular la producción diaria de sedimentos (Y). El factor</p>	<p>Aplicación de la ecuación universal de pérdida de suelo (MUSLE) en la predicción de producción de sedimentos (caso de</p>

Modelo	Concepto	Diferencias	Estudios de caso / escala
	energía cinética es remplazado por un factor independiente de escorrentía "(Q*qp)" (Williams y Berndt 1977, Zhang <i>et al.</i> 2009)	independiente de escorrentía en MUSLE (Q*qp) sustituye el valor de erosividad (R) en USLE: $Y = 11,8 (Q*qp)^{0,56} * K * LS * C * P$ (Williams y Berndt 1977)	estudio: Cuenca Kengir, Irán) (Arekhi <i>et al.</i> 2011), cuenca (413,7 km ²). Análisis de incertidumbre de los parámetros en el modelado hidrológico y de sedimentos con el método GLUE: un estudio de caso del modelo SWAT en la región de las Tres Gargantas, China (Shen <i>et al.</i> 2012), cuenca (4426 km ²). Impacto del cambio climático en la producción de sedimentos en la cuenca del río Mekong (Shrestha <i>et al.</i> 2013), cuenca (26180 km ²).

2.4 Modelos hidrológicos

El modelado del balance hidrológico o de datos extremos es muy útil para el manejo y la planificación del recurso hídrico. Además, es una importante herramienta para estimar elementos del ciclo hidrológico en áreas de interés (Bárdossy 2007). De acuerdo con Cabrera (2015), existe una gran cantidad de modelos hidrológicos, los cuales se pueden dividir en tres grupos: según la conceptualización de sus procesos (empíricos, conceptuales, basados en procesos); según la naturaleza de los algoritmos (determinísticos, estocásticos) y según su distribución espacial (agrupados, distribuidos). Algunos de los modelos hidrológicos comúnmente usados son:

ARTmodel¹, WBMsed², Pelletier's model, PSIAC³, FSM⁴, SPADS⁵, SSY Index model⁶, (Ann) AGNPS⁷, LISEM⁸, PESERA⁹ y SWAT, entre otros (Cohen *et al.* 2013; de Vente *et al.* 2013).

2.5 Modelo SWAT

El Soil and Water Assessment Tool (SWAT), es un modelo de base física creado a inicios de los años 1990, desarrollado inicialmente para el departamento de agricultura de los Estados Unidos de América (USDA). Este modelo predice el impacto de prácticas de manejo del suelo en el agua, sedimentos y agroquímicos entre otros, en cuencas con diferentes tipos de suelo, manejo y uso de la tierra (Arnold y Fohrer 2005; Neitsch *et al.* 2011).

SWAT es una herramienta interdisciplinaria de modelado de cuencas, debido a lo cual tiene gran aceptación internacional y es usado en gran cantidad de países. Entre sus aplicaciones están la calidad y disponibilidad de agua, producción agrícola, cambio climático, entre otros (Githui *et al.* 2009; Ullrich y Volk 2009; Dile *et al.* 2016).

El modelo SWAT divide la cuenca hidrográfica en subcuencas y estas, a su vez, son divididas en unidades de respuesta hidrológica (HRU). Estas unidades tienen en común las variables cobertura, suelo y manejo. Los datos de entrada del modelo son: precipitación, temperatura, uso de suelo (cobertura), mapa de suelos, modelo de elevación digital (MED) y la red de drenajes (Gassman *et al.* 2006; Neitsch *et al.* 2011).

Este modelo tiene como particularidad que ha sido utilizado en más de 100 países en aplicaciones de recurso hídrico y contaminación no puntual. Para marzo del 2016 se habían registrado más de 2700 artículos en 500 diferentes revistas donde se utilizó este modelo, lo cual muestra a SWAT como una herramienta confiable (Dile *et al.* 2016).

Los sistemas de información geográfica (GIS), se han integrado muy bien con el modelo SWAT; de esta manera se pueden manipular, analizar y visualizar las entradas y salidas del modelo. Las primeras interfaces de SWAT fueron en los programas Windows (Visual Basic), GRASS y ArcView (Neitsch *et al.* 2011); posteriormente el programa ArcGIS y su interface ArcSWAT han tenido mucha popularidad. Debido al alto costo del programa ArcGIS y al uso creciente de los programas de código abierto, en el año 2015 sale QSWAT, la interfaz para el software de código abierto Quantum GIS, conocido como QGIS. Esta interfaz hace todas las

¹ Area Relief Temperature sediment delivery model

² Water Balance Model Sediment

³ Pacific Southwest Inter-Agency Committee

⁴ Factorial Scoring Model

⁵ SPATIally Distributed Scoring model

⁶ Scale Sediment Yield index

⁷ Annualized AGRicultural Non-Point Source Pollution Model

⁸ Limburg Soil Erosion Model

⁹ Pan-European Soil Erosion Risk Assessment

funciones que realiza ArcSWAT, además de realizar prestaciones adicionales como la unión de subcuencas y la visualización de salidas (Dile *et al.* 2016).

2.5.1 Calibración del modelo SWAT

De acuerdo con Arnold *et al.* (2012), el modelo SWAT tiene una gran cantidad de parámetros de entrada, por lo que se hace complicada la calibración del modelo. A raíz de esto se han desarrollado varias técnicas de calibración tanto manuales como automáticas. SWAT-CUP es un programa que vincula varios procedimientos como: SUFI2, GLUE, PSO, Parasol y MCMC que permiten realizar análisis de sensibilidad, calibración y validación de los modelos (Abbaspour 2015).

2.6 Sistemas de clasificación climática

Un sistema de clasificación climática es un modelo que, con base en información climática, puede predecir la composición vegetal de un determinado lugar. Algunos modelos son el propuesto por Köppen (Peel *et al.* 2007), el modelo de Thornthwaite (Thornthwaite 1948; Feddema 2005) y el de Holdridge (Holdridge 1964), por mencionar algunos. De los modelos anteriormente mencionados, el modelo de Köppen es el más utilizado mundialmente, mientras que el modelo de Thornthwaite es poco usado debido a su complejidad. Finalmente, el modelo de Holdridge ha sido usado en bastantes países debido a la facilidad de uso ya que solo requiere datos de temperatura y precipitación anual (Tosi 1964; Feddema 2005).

2.6.1 Sistema de zonas de vida de Holdridge

Después de trabajar por muchos años en los trópicos, Leslie Holdridge se interesó por los sistemas de clasificación climáticos. Luego de estudiar y analizar sistemas de clasificación preexistentes, en 1947 desarrolló un sistema de zonas de vida basado en valores anuales de precipitación y biotemperatura (Holdridge 1964; Tosi 1964). Este sistema puede ser aplicado en prácticamente todas las zonas del mundo. Una de sus ventajas es que demanda pocos datos, entonces es muy aplicado en países en desarrollo donde los datos climáticos son limitados (Yates *et al.* 2000; Zheng *et al.* 2006).

Para determinar cualquier zona de vida se utiliza un diagrama, que es la representación gráfica del sistema (Figura 2). A partir de datos de biotemperatura, precipitación y humedad que se expresan en progresión logarítmica (Tosi y Voertman 1977; Jiménez *et al.* 2010), se puede clasificar casi cualquier zona de vida, además de su respectivo piso altitudinal y región latitudinal (Holdridge 1964).

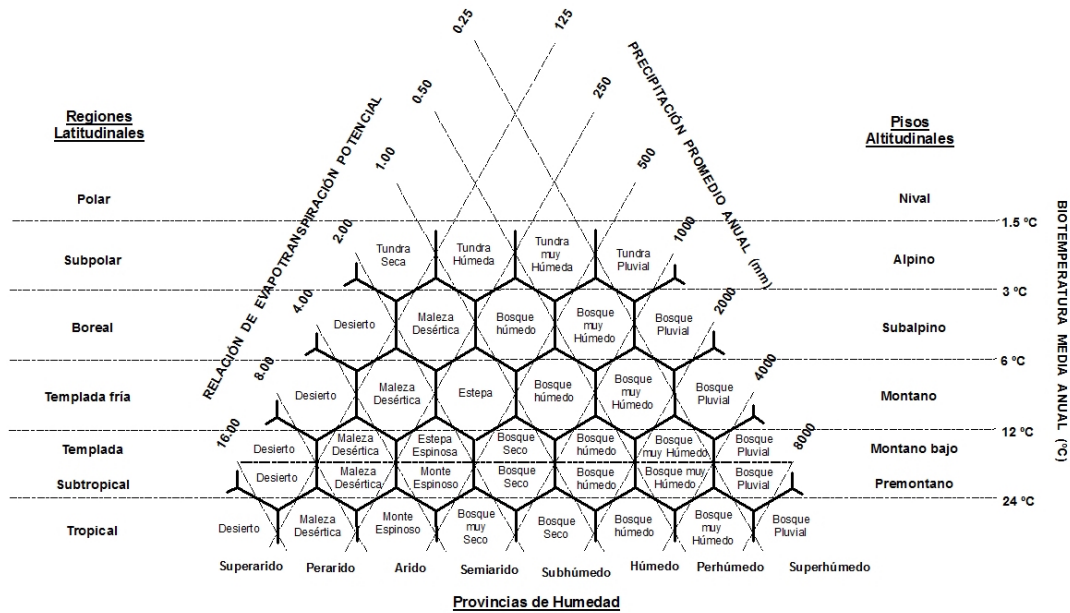


Figura 2. Diagrama de zonas de vida de Holdridge
Fuente: Holdridge (1964)

Aunque existen sistemas de clasificación climática ampliamente usados como el de Köppen, su aplicabilidad en regiones tropicales es bastante tosca, principalmente por la gran variación de precipitación y temperatura en pequeñas distancias. Otra razón del uso del sistema de zonas de vida de Holdridge en los trópicos se debe a que la biotemperatura varía poco a través del año cerca del Ecuador, no así cuando nos acercamos a los polos, donde las diferencias de biotemperatura entre estaciones son mayores, volviendo poco efectivo este sistema de clasificación climático (Holdridge *et al.* 1971).

2.6.1.1 Biotemperatura

Holdridge (1964), describe la biotemperatura como una medida de calor donde las plantas crecen efectivamente. Este rango de crecimiento de la vegetación se da entre los 0 y los 30°C, (Zheng *et al.* 2006). La biotemperatura se obtiene promediando las temperaturas diarias donde se da el crecimiento vegetativo. En el caso que no se cuente con temperaturas diarias, se pueden utilizar promedios mensuales y mediante una fórmula empírica se pueden convertir datos mensuales de temperatura a biotemperatura mensual.

$$t_{bio} = t - \frac{[3 * \text{grados latitud}]}{100} * (t - 24)^2$$

Donde:

t_{bio} = biotemperatura mensual en °C

t = temperatura media mensual en °C

2.6.1.2 Precipitación

Para la determinación de zonas de vida de Holdridge se utiliza la precipitación promedio anual en milímetros. Esta puede caer en forma de lluvia, nieve o granizo; se descarta la precipitación horizontal y la condensación directa sobre la vegetación ya que, aunque en ciertas zonas su cantidad es considerable, la falta de instrumentos que miden estos parámetros en estaciones meteorológicas dificulta su cuantificación. La precipitación en el diagrama de zonas de vida varía de izquierda a derecha (Holdridge 1964). Al usarse la precipitación anual, se da más importancia a la cantidad de agua que a la distribución de la misma a lo largo del año. Holdridge *et al.* (1971) mencionan que, al moverse de regiones más áridas hacia más húmedas en el diagrama de zonas de vida, la duración de la estación seca disminuye.

2.6.1.3 Humedad

El último factor que determina las zonas de vida es la humedad. Este parámetro se obtiene mediante la relación de evapotranspiración potencial que equivale al cociente de la evapotranspiración potencial anual entre la precipitación anual. Se entiende como la cantidad teórica de agua que se podría ceder a la atmósfera bajo condiciones climáticas y edáficas zonales, bajo el supuesto de disponibilidad de agua durante el periodo de crecimiento. Mientras que la relación de evapotranspiración aumenta, la cantidad de humedad disminuye, por lo que la zona de vida se vuelve más árida (Holdridge 1964). Si se toma en cuenta que la evapotranspiración potencial puede ser calculada simplemente multiplicando la biotemperatura por 58,93, entonces el factor humedad es una función de las variables precipitación y biotemperatura (Yates *et al.* 2000).

2.6.1.4 Regiones latitudinales

Según Tosi (1964), el clima del planeta está dividido en siete regiones latitudinales: tropical, subtropical, templada cálida, templada fría, boreal, subpolar y polar. Cada región está relacionada a una determinada biotemperatura a nivel del mar. Además, estas regiones se encuentran correlacionadas a variaciones en las temperaturas durante el año, la duración del día y el ángulo de inclinación de los rayos solares. Las biotemperaturas a nivel del mar de estas regiones disminuyen conforme se alejan del ecuador.

2.6.1.5 Pisos altitudinales

Los pisos altitudinales están determinados por la biotemperatura anual de los mismos, la cual tiene una tasa de cambio de aproximadamente 6°C cada mil metros de elevación (Holdridge 1964). El piso basal se encuentra a nivel del mar, en la región latitudinal tropical existen seis pisos altitudinales arriba del piso basal: premontano, montano bajo, montano, subalpino, alpino y nival. El número de pisos disminuye al alejarse del Ecuador (Figura 3), llegando a presentarse solo el piso nival en la región latitudinal polar (Tosi 1964).

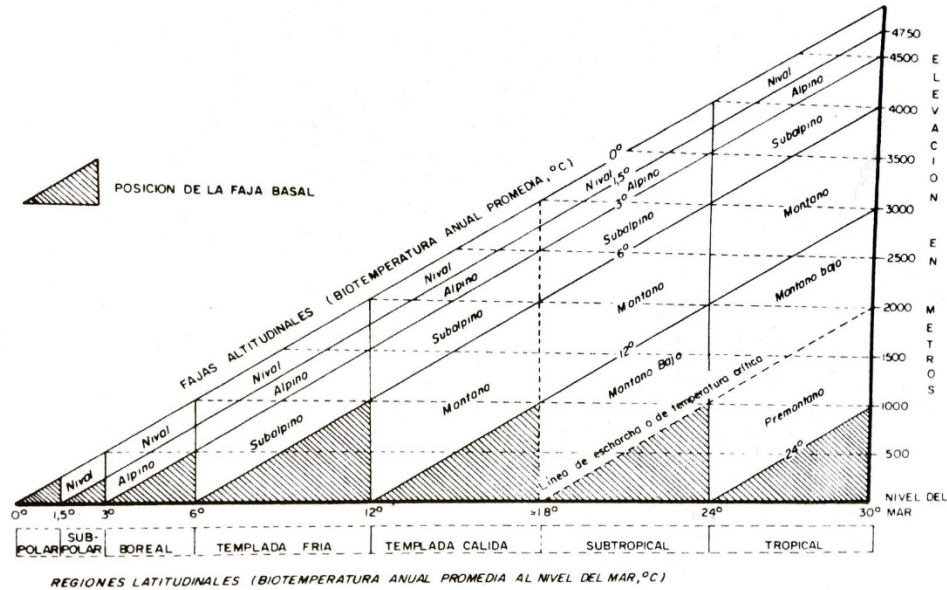


Figura 3. Posiciones aproximadas de las regiones latitudinales y fajas altitudinales en el sistema zonas de vida de Holdridge
 Fuente: Holdridge 1964.

2.7 Cambio climático

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), en su Quinto Informe de Evaluación (AR5), recalcan que desde el año 1950 se han producido una serie de cambios del sistema climático nunca vistos. Evidencia de esto es que los océanos y la atmósfera se han calentado, las masas de hielo y nieve han disminuido su tamaño, el nivel del mar ha subido y la concentración de gases de efecto invernadero ha aumentado. Todo esto, principalmente ha sido producto de la influencia del ser humano (IPCC 2014). Algunos de los cambios observados en la atmósfera se muestran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Principales cambios atmosféricos observados según la IPCC en su quinto informe de evaluación

Aumento de 0,85°C en la temperatura media mundial durante el periodo 1880-2012.
Las últimas 3 décadas han sido las más calientes en los últimos 160 años. La primera década del siglo XXI fue la más caliente de todas.
Existe mucha variabilidad en las tendencias durante periodos cortos de tiempo.
La precipitación media ha aumentado en las latitudes medias del hemisferio norte desde 1950.
Cambios en los episodios extremos desde 1950. Aumento en el número de días y noches calientes y disminución de días y noches frías.

Fuente: Rodríguez Camino *et al.* 2014

2.8 Escenarios de clima futuro

El quinto Informe de Evaluación define cuatro nuevos escenarios de emisión, conocidos como Sendas Representativas de Concentración (RCP), donde el forzamiento radiactivo para el año 2100 varía de 2,6 a 8,5 W/m². Una de las ventajas de estos nuevos escenarios con respecto a los anteriores es que algunos de los nuevos RCP contemplan efectos de políticas orientadas a frenar el cambio climático (Rodríguez Camino *et al.* 2014).

2.9 Efecto del cambio climático en las zonas de vida

El sistema de zonas de vida de Holdridge se ha usado para modelar el efecto del cambio climático en la vegetación (Cuadro 3). La adopción de este modelo se debe principalmente a su fácil uso, a los pocos parámetros de entrada y a su aplicación en casi todo el mundo (Fan *et al.* 2013; Khatun *et al.* 2013).

Cuadro 3. Estudios de caso donde se utiliza el sistema de zonas de vida de Holdridge para modelar cambios en la vegetación

Título	Metodología	Lugar	Referencia
<p>Una evaluación de los impactos del cambio climático en los bosques tropicales de América Central utilizando el sistema de clasificación de zonas de vida de Holdridge (ZVH)</p>	<p>Variables: precipitación y temperatura.</p> <p>Datos: resolución espacial de 1 km x 1 km obtenidos de WorldClim (1950-2000), datos futuros del modelo ECHAM5-GCM. Años (2070-2099). Escenarios A2, A1B y B1.</p> <p>Escala: región centroamericana. (522 760 km²).</p>	<p>Centroamérica (Guatemala, Belice, Honduras, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica, Panamá)</p>	<p>Khatun <i>et al.</i> (2013)</p>
<p>Efectos del cambio climático en la distribución de zonas de vida en Centroamérica</p>	<p>Variables: precipitación, temperatura y elevación.</p> <p>Datos: resolución espacial de 1 km x 1 km obtenidos de WorldClim (1950-2000), datos futuros de Providing Regional Climates for Impacts Studies (PRECIS). Años (2011-2040). Escenarios A2 y B1.</p> <p>Escala: región centroamericana. (522 760 km²).</p>	<p>Centroamérica (Guatemala, Belice, Honduras, El Salvador, Nicaragua, Costa Rica, Panamá)</p>	<p>Jiménez <i>et al.</i> (2010)</p>
<p>Cambios en la cobertura terrestre de las zonas de transición del bioma en la meseta de Loess de China</p>	<p>Variables: capas de biotemperatura media anual, precipitación media anual y relación de evapotranspiración potencial.</p> <p>Datos: tienen una resolución espacial de 1 km x 1 km y provienen del Advanced Very High Resolution Radiometer</p>	<p>Meseta Loess, China</p>	<p>Fan <i>et al.</i> (2013)</p>

Título	Metodología	Lugar	Referencia
	<p>(AVHRR). Años 1985, 1995 y 2005.</p> <p>Escala: Altiplano en la cuenca alta y media del río Amarillo (640 000 km²).</p>		
<p>Cambios en la diversidad de las zonas de vida de Holdridge en la Región Autónoma Uygur de Xinjiang (XUAR), China en los últimos 40 años</p>	<p>Variables: datos mensuales de temperatura, precipitación, humedad, velocidad del viento y radiación solar.</p> <p>Datos: datos provenientes de 84 estaciones (1961-2000), se realizó interpolación espacial (<i>co-kriging</i>) para generar capas de 1 km x 1 km de resolución.</p> <p>Escala: región autónoma (1 664 897 km²).</p>	<p>Región autónoma Xinjiang Uygur (XUAR), China.</p>	<p>Zheng <i>et al.</i> (2006)</p>
<p>Comparando el modelo correlativo de Holdridge con modelos biogeográficos mecanísticos para evaluar la respuesta de la distribución de la vegetación al cambio climático</p>	<p>Variables: datos diarios y mensuales de temperatura, precipitación, radiación, humedad y velocidad del viento.</p> <p>También se usaron los modelos mecanísticos de simulación de vegetación: BIOME2, Dynamic Global. Phytogeography Model (DOLY) y Mapped Atmosphere-Plant-Soil System (MAPSS).</p> <p>Datos: los datos provienen del Vegetation/Ecosystem Modeling and Analysis Project (VEMAP), la resolución de los datos es de 0,5° x 0,5°; para</p>	<p>Estados Unidos de América (menos Alaska)</p>	<p>Yates <i>et al.</i> (2000)</p>

Título	Metodología	Lugar	Referencia
	<p>los escenarios de cambio climático se usaron los modelos: GFDL, OSU y UKMO.</p> <p>Escala: país (8 115 661 km²).</p>		
<p>La posible respuesta de las zonas de vida en China bajo el cambio climático global</p>	<p>Variables: datos mensuales de biotemperatura, precipitación, relación de evapotranspiración potencial. También se utilizó el modelo global climático CSIRO.</p> <p>Datos: datos provenientes NCAR regional climate model 2 (RegCM2) con una resolución espacial de 0,5° x 0;5°.</p> <p>Escala: país (9 596 961 km²).</p>	<p>República Popular China</p>	<p>Chen <i>et al.</i> (2003)</p>

3. PRINCIPALES RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Se simuló la producción de agua y erosión en la subcuenca del río Tempisquito para el periodo base (2008-2013). Después de la calibración del modelo con el algoritmo SUFI-2, se logró un muy buen ajuste en la simulación del caudal (NSE 0,70) a la salida de la subcuenca. El Cuadro 4 presenta los resultados de la simulación.

Cuadro 4. Componentes del balance hídrico, producción de agua y erosión hídrica durante el periodo 2008-2013 en la subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica

Componente		Valor
Precipitación	PREC	2516,5
Evapotranspiración	ET	919,1
Escorrentía superficial	SURQ	403,47
Flujo lateral	LATQ	313,04
Flujo de retorno	GWQ	796,02
Producción de agua	WYLD	1512,53
Erosión hídrica	SYLD	122,24

Todas las unidades son en mm, excepto la erosión que es en $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$

La modelación hidrológica futura se realizó para el año 2070 para los RCP's 4.5 y 8.5 y bajo 5 MCG. En el RCP 4.5, el 60% de los modelos indican que la producción de agua aumenta y en el 80% aumenta en producción de sedimentos. Para el RCP 8.5 el 75% de los MCG indican que la producción de agua y la de sedimentos aumenta (Cuadro 5).

Cuadro 5. Componentes del balance hídrico, producción de agua y erosión hídrica bajo condiciones de clima futuro (2070), en la subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica

Escenario	MCG	PREC	ET	SURQ	LATQ	GWQ	WYLD	SYLD
RCP 4.5	ccsm4	2388,5	956,0	326,7	298,6	696,1	1321,4	105,3
	cesm1_cam5_1_fv2	2501,9	968,8	380,1	310,1	740,1	1430,2	137,7
	cnrm_cm5	2863,1	982,8	487,0	364,3	927,4	1778,7	169,7
	mpi_esm_lr	2972,8	965,5	561,5	375,6	971,1	1908,2	207,9
	mri_cgcm3	2976,4	977,7	553,6	378,0	958,6	1890,2	198,6
RCP 8.5	ccsm4	2027,0	954,0	225,6	242,6	483,7	951,8	64,5
	cnrm_cm5	2912,8	926,8	515,8	373,2	957,8	1846,7	187,2
	mpi_esm_lr	3216,0	979,8	673,9	405,9	1059,9	2139,7	293,3
	mri_cgcm3	3649,8	983,1	916,7	452,3	1198,6	2567,5	401,6

Todas las unidades son en mm, excepto la erosión que es en $t\ ha^{-1}\ año^{-1}$

Además, a nivel de cauces se esperan variaciones en el caudal y en la carga de sedimentos. Las mismas van a depender tanto de la cantidad de precipitación que proyecte el modelo usado, como de su distribución entre los meses de estación seca y lluviosa.

4. LITERATURA CITADA

- Abbaspour, KC; Rouholahnejad, E; Vaghefi, S; Srinivasan, R; Yang, H y Kløve, B. 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology* 524:733-752.
- Allen, RG; Pereira, LS; Raes, D y Smith, M. 1998. Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements. Rome, Italy, FAO. 15 p. (FAO Irrigation and drainage paper 56).
- Allen, KE; Padgett Vásquez, S. 2017. Forest cover, development, and sustainability in Costa Rica: Can one policy fit all? *Land Use Policy* 67:212-221.
- Arekhi, S; Shabani, A; Rostamizad, G. 2011. Application of the modified universal soil loss equation (MUSLE) in prediction of sediment yield (Case study: Kengir Watershed, Iran). *Arabian Journal of Geosciences* 56:1259-1267.
- Arnold, JG; Allen, PM; Bernhardt, G. 1993. A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology* 142:47-69.
- Arnold, JG; Fohrer, N. 2005. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes* 193:563-572.
- Arnold, JG; Moriasi, DN; Gassman, PW; Abbaspour, KC; White, MJ; Srinivasan, R; Santhi, C; Harmel, RD; van Griensven, A; Van Liew, MW; Kannan, N; Jha, MK. 2012. SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE* 55(4):1491-1508.
- Arroyo, P; Sánchez-Azofeifa, A; Rivard, B; Calvo-Alvarado, J; Janzen, DH. 2005. Dynamics in forest landscape structure and composition for the Chorotega region, Costa Rica from 1960 to 2000. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 106:27-39.
- Baish, S. 2001. Preservando la Integridad Ecológica de la Cuenca del Río Tempisque. *In* Jiménez, JA; González, E. La cuenca del Río Tempisque: perspectivas para un manejo integrado San José, Costa Rica, Organización para Estudios Tropicales. 150 p.
- Bewket, W; Teferi, E. 2009. Assessment of soil erosion hazard and prioritization for treatment at the watershed level: Case study in the Chemoga watershed, Blue Nile basin, Ethiopia. *Land Degradation & Development* 206:609-622.
- Birkel, C; Soulsby, C; Tetzlaff, D. 2012. Modelling the impacts of land-cover change on streamflow dynamics of a tropical rainforest headwater catchment. *Hydrological Sciences Journal* 57(8):1543-1561.
- Brauman, KA; Daily, GC; Duarte, TK; Mooney, HA. 2007. The Nature and Value of Ecosystem Services: An Overview Highlighting Hydrologic Services. *Annual Review of Environment and Resources* 32(1):67-98.

- Brauman, KA. 2015. Hydrologic ecosystem services: linking ecohydrologic processes to human well-being in water research and watershed management. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 2(4):345-358.
- Cabrera, J. 2015. Modelos hidrológicos (en línea). Consultado 11 feb. 2017. Disponible en http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_1.pdf. 1-8.
- Calder, IR. 2002. Forests and Hydrological Services: Reconciling public and science perceptions. *Land Use and Water Resources Research*:2(2.1-2.12).
- Calder, IR. 2004. Forests and water- Closing the gap between public and science perceptions. *Water Science & Technology* 49(7):39-53.
- Calvo, JC. 1986. An evaluation of Thornthwaite's water balance technique in predicting stream runoff in Costa Rica. *Hydrological Sciences Journal* 31(1):51-60.
- Calvo, J. 1990. The Costa Rican national conservation strategy for sustainable development: exploring the possibilities. *Environmental Conservation* 17:355-358.
- Calvo, J; Gregory, J. 1997. Predicting Mean Annual Runoff and Suspended Sediment Yield in Rural Watersheds in North Carolina. North Carolina, United States of America, University of North Carolina. 156 p. (Report No. 307)
- Calvo-Alvarado, JC. 1998. Suspended sediment yield prediction for Costa Rican watersheds. *In* Johnson, AI; Fernandez-Jauregui, C (eds). *Hydrology in the Humid Tropics*. Ciudad, País, International Association for Hydrological Sciences Publ 27-32.
- Calvo-Alvarado, JC; Jiménez, JA; González, E; Pizarro, F y Jiménez, A. 2008. Determinación preliminar del caudal ambiental en el río Tempisque, Costa Rica: el enfoque hidrológico con limitación de datos. *Kurú: Revista Forestal* 5(13):1-18.
- Calvo-Alvarado, J; McLennan, B; Sánchez-Azofeifa, A y Garvin, T. 2009. Deforestation and forest restoration in Guanacaste, Costa Rica: Putting conservation policies in context. *Forest Ecology and Management* 258(6):931-940.
- Carvajal-Vanegas, D; Calvo-Alvarado, J. 2012. Intercepción de precipitación en dos especies forestales nativas: *Vochysia guatemalensis* Donn. Sm. y *Vochysia ferruginea* Mart. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú* 9(22):32-39.
- Cavelier, J; Vargas, G. 2002. Procesos hidrológicos. *In* Guariguata, M; Kattan, G (eds.). *Ecología y conservación de bosques tropicales*. Cartago, Costa Rica, Libro Universitario Regional. p. 145-165.
- Chen, T; Niu, R-q; Li, P-x; Zhang, L-p; Du, B. 2010. Regional soil erosion risk mapping using RUSLE, GIS, and remote sensing: a case study in Miyun Watershed, North China. *Environmental Earth Sciences* 633:533-541.
- Chen, X; Zhang, X-S; Li, B-L. 2003. The possible response of life zones in China under global climate change. *Global and Planetary Change* 383-4:327-337.
- Dabral, PP; Baithuri, N; Pandey, A. 2008. Soil Erosion Assessment in a Hilly Catchment of North Eastern India Using USLE, GIS and Remote Sensing. *Water Resources Management* 2212:1783-1798.
- de Vente, J; Poesen, J; Verstraeten, G; Govers, G; Vanmaercke, M; Van Rompaey, A; Arabkhedri, M; Boix-Fayos, C. 2013. Predicting soil erosion and sediment yield at regional scales: Where do we stand? *Earth-Science Reviews* 127:16-29.

- Dile, YT; Daggupati, P; George, C; Srinivasan, R; Arnold, J. 2016. Introducing a new open source GIS user interface for the SWAT model. *Environmental Modelling & Software* 85:129-138.
- Fan, Z-M; Li, J; Yue, T-X. 2013. Land-cover changes of biome transition zones in Loess Plateau of China. *Ecological Modelling* 252:129-140.
- Freeze, RA; Cherry, JA. 1979. *Groundwater*. London, United Kingdom, Prentice-Hall. 617 p.
- Feddema, JJ. 2005. A Revised Thornthwaite-Type Global Climate Classification. *Physical Geography* 26(6):442-466.
- Fu, BJ; Zhao, WW; Chen, LD; Zhang, QJ; Lü, YH; Gulinck, H; Poesen, J. 2005. Assessment of soil erosion at large watershed scale using RUSLE and GIS: a case study in the Loess Plateau of China. *Land Degradation & Development* 16:73-85.
- García, JE. 1999. Análisis preliminar del uso de plaguicidas en la Cuenca del Río Tempisque *Revista Acta Académica* 25:51-62.
- Gassman, PH; Secchi, S; Jha, M. 2006. Upper Mississippi river basin modelling system part 1: SWAT input data requirements and issues. *Coastal Hydrology and Processes* 8:103-116.
- Giorgi, F. 2006. Climate change hot-spots. *Geophysical Research Letters* 33(8):1-4.
- Githui, F; Gitau, W; Mutua, F; Bauwens, W. 2009. Climate change impact on SWAT simulated streamflow in western Kenya. *International Journal of Climatology* 29:1823-1834.
- Guzmán, I; Calvo-Alvarado, JC. 2012. Water resources of the Upper Tempisque River Watershed, Costa Rica. *Tecnología en Marcha* 25(4):63-70.
- Iroumé, A; Palacios, H; Bathurst, J; Huber, A. 2010. Escorrentías y caudales máximos luego de la cosecha a tala rasa y del establecimiento de una nueva plantación en una cuenca experimental del sur de Chile. *Bosque* 31(2):117-128.
- Hargreaves, GH; Samani, ZA. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture* 1(2):96-99.
- Holdridge, LR. 1964. *Life Zone Ecology*. San José, Costa Rica, Centro Científico Tropical. 206 p.
- Holdridge, LR; Grenke, WC; Hatheway, WH; Liang, T; Tosi, JA. 1971. *Forest environments in tropical life zones*. Oxford, United Kingdom, Pergamon Press. 747 p.
- IPCC. 2014. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectorial Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Eds. VRB C.B. Field, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, KLE M. Chatterjee, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, PRM S. Maccracken, L.L. White. Cambridge, United Kingdom, Cambridge University Press. 1132 p.
- Janzen, DH. 1986. *Guanacaste National Park: tropical ecological and cultural restoration*. San José, Costa Rica, EUNED-FPN-PEA. 104 p.
- Jiménez, J; Calvo-Alvarado, J; Pizarro, F; González, E. 2005. *Conceptualización de caudal ambiental en Costa Rica: Determinación inicial para el río Tempisque*. San José, Costa Rica, UICN. 40 p.
- Jiménez, M; Chain, A; Locatelli, B. 2010. Efectos del cambio climático en la distribución de zonas de vida en Centroamérica. *Recursos Naturales y Ambiente* 59-60:32-40.
- Jiménez-Rodríguez, CD; Calvo-Alvarado, JC; Jackson, JK. 2015. Performance of Two Hydrological Models in Predicting Daily Flow under a Climate Change Scenario for Mountainous

- Catchments in Northwestern Costa Rica. *Mountain Research and Development* 35(3):240-253.
- Jiménez-Rodríguez, CD; Calvo-Alvarado, J. 2014. An Evaluation of Rainfall Interception in Secondary Tropical Dry Forests. *In* Sánchez-Azofeifa, GA; Powers, JS.; Fernandes, GW; Quesada, M (eds.). *Tropical Dry Forests in the Americas: Ecology, Conservation and Management*. Florida, United States of America, CRC Press. p.250-266.
- Khatun, K; Imbach, P; Zamora, J. 2013. An assessment of climate change impacts on the tropical forests of Central America using the Holdridge Life Zone (HLZ) land classification system. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 64:183-189.
- Komatsu, H; Cho, J; Matsumoto, K; Otsuki, K. 2012. Simple modeling of the global variation in annual forest evapotranspiration. *Journal of Hydrology* 420-421:380-390.
- Madej, MA. 2001. Erosion and Sediment Delivery Following Removal of Forest Roads. *Earth Surf. Process. Landforms* 26:175-190.
- Margulis, SA. 2016. Introduction to Hydrology. Disponible en http://aquea.seas.ucla.edu/Margulis_intro_to_hydro_textbook.html. 423 p.
- Murcia, C; Muñoz-Carpena, R; Sasa, M. 2012. Modelaje integrado de cambio climático y socioeconómico en el manejo sostenible del recurso hídrico en la cuenca Arenal-Tempisque: Una propuesta multidisciplinaria. *Revista de Ciencias Ambientales* 431:47-62.
- Neitsch, SL; Williams, JR; Arnold, JG; Kiniry, JR. 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas Water Resources Institute. 618 p.
- Newbold, JD; Sweeney, BW; Jackson, JK y Kaplan, LA. 1995. Concentrations and export of solutes from six mountain streams in northwestern Costa Rica. *Journal of the North American Benthological Society* 14(1):21-37.
- Núñez, J. 2010. Manejo y conservación de suelos. San José, Costa Rica, EUNED. 288 p.
- Pabón, JD; Chaparro, R. 2001. Colombia en el ambiente global. *In* Leyva, P (ed.). *El medio ambiente en Colombia*. 2 ed. Bogotá, Colombia, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- Peel MC; Finlayson, BL; Memahon, TA. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 11(5):1633-1644.
- Penman, HL. 1956. Estimating evaporation. *Transactions American Geophysical Union* 37(1):43-49.
- Pradhan, B; Chaudhari, A; Adinarayana, J; Buchroithner, MF. 2012. Soil erosion assessment and its correlation with landslide events using remote sensing data and GIS: a case study at Penang Island, Malaysia. *Environ Monit Assess* 1842:715-27.
- Prasannakumar, V; Shiny, R; Geetha, N; Vijith, H. 2011. Spatial prediction of soil erosion risk by remote sensing, GIS and RUSLE approach: a case study of Siruvani river watershed in Attapady valley, Kerala, India. *Environmental Earth Sciences* 644:965-972.
- Renard, KG; Foster, GR; Weesies, GA; McCool, DK; Yoder, DC. 1997. Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Washington, United States of America, USDA. 404 p. (Agriculture Handbook No. 703).

- Rodríguez Camino, E; Ruggeroni, JRP; Hernández, FH. 2014. Quinto informe de Evaluación del IPCC: bases físicas. *Tiempo y Clima* 43:36-40.
- Sader, SA; Joyce, AT. 1988. Deforestation Rates and Trends in Costa Rica, 1940 to 1983. *Biotropica* 20(1):11-19.
- Sánchez-Azofeifa, GA; Harriss, RC; Skole, DL. 2001. Deforestation in Costa Rica: A Quantitative Analysis Using Remote Sensing Imagery. *Biotropica* 33(3):378-384.
- Shaw, EM; Beven, KJ; Chappell, NA; Lamb, R. 2010. *Hydrology in practice*. Fourth ed. New York, United States of America, Spon Press. 535 p.
- Shen, ZY; Chen, L; Chen, T. 2012. Analysis of parameter uncertainty in hydrological and sediment modeling using GLUE method: a case study of SWAT model applied to Three Gorges Reservoir Region, China. *Hydrology and Earth System Sciences* 161:121-132.
- Shrestha, B; Babel, MS; Maskey, S; van Griensven, A; Uhlenbrook, S; Green, A; Akkharath, I. 2013. Impact of climate change on sediment yield in the Mekong River basin: a case study of the Nam Ou basin, Lao PDR. *Hydrology and Earth System Sciences* 171:1-20.
- Stratford, C; Ratcliffe, J; Hughes, AG; Roberts, J; Robins, NS. 2007. Complex interaction between shallow groundwater and changing woodland, surface water, grazing and other influences in partly wooded duneland in Anglesey, Wales. *In Proceedings of the CDXXXV congress international association of hydrogeologists: groundwater and ecosystems*. International Association of Hydrogeologists 1-10 p.
- Thornthwaite, CW. 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review* 38(1):55-94.
- Thornthwaite, CW y Mather, JR. 1951. The role of evapotranspiration in climate. *Archiv für Meteorologie, Geophysik und Bioklimatologie* 3(1):16-39.
- Tosi, JA. 1964. Climatic control of terrestrial ecosystems: a report on the Holdridge model. *Economic Geography* 40(2):173-181.
- Tosi, JA; Voertman, RF. 1977. Máximo aprovechamiento de los bosques (en línea). *Bosques y Fauna*: Consultado 14 nov. 2016. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-f9645s/f9645s01.htm#TopOfPage>
- Trezza, R. 2008. Estimación de evapotranspiración de referencia a nivel mensual en Venezuela: ¿Cuál método utilizar? *Bioagro* 20(2):89-95.
- Ullrich, A; Volk, M. 2009. Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to predict the impact of alternative management practices on water quality and quantity. *Agricultural Water Management* 96:1207-1217.
- Villón, M. 2004. *Hidrología*. Cartago, Costa Rica, ITCR. 400 p.
- Webb, AA; Kathuria, A; Turner, L. 2012. Longer-term changes in streamflow following logging and mixed species eucalypt forest regeneration: The Karuah experiment. *Journal of Hydrology* 464-465:412-422.
- Williams, JR; Berndt, HD. 1977. Sediment Yield Prediction Based on Watershed Hydrology. *Transactions of the ASAE*:1100-1104.
- Wischmeier, WH; Smith, DD. 1965. *Rainfall-erosion Losses from Cropland East of the Rocky Mountains- a guide for selection practices for soil and water conservation*. Washington, United States of America, USDA. 49 p. (Agriculture Handbook No. 282)

- Wischmeier, WH; Smith, DD. 1978. Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning. Washington, United States of America, USDA. 69 p. (Agriculture Handbook No. 573).
- Xu, C-Y. 1999. Climate Change and Hydrologic Models: A Review of Existing Gaps and Recent Research Developments. *Water Resources Management* 13:369-382.
- Yuste, JAF; Sanz, VG; Roldán, MS. 2005. Los Factores C y LS en la RUSLE V.1.06 en su Aplicación a la Evaluación de la Pérdida de Suelo en la Cuenca Alta del Río Cega (Segovia): contraste de resultados con los valores obtenidos con USLE. *Congresos Forestales*:1-8.
- Yates, DN; Kittel, TGF; Cannon, RF. 2000. Comparing the correlative Holdridge model to mechanistic biogeographical models for assessing vegetation distribution response to climatic change. *Climatic Change* 44:59-87.
- Zhang, Y; Degroote, J; Wolter, C ; Sugumaran, R. 2009. Integration of modified universal soil loss equation (MUSLE) into a gis framework to assess soil erosion risk. *Land Degradation & Development* 20(1):84-91.
- Zheng, Y; Xie, Z; Jiang, L; Shimizu, H; Drake, S. 2006. Changes in Holdridge Life Zone diversity in the Xinjiang Uygur Autonomous Region (XUAR) of China over the past 40 years. *Journal of Arid Environments* 66(1):113-126.

CAPÍTULO II

ARTÍCULO I. Línea base de producción de agua y sedimentos en la subcuenca del río Tempisquito

RESUMEN

Los modelos hidrológicos son herramientas útiles para predecir el impacto del cambio del uso de la tierra, prácticas de manejo en la agricultura y el cambio climático a nivel de cuenca. El objetivo de este trabajo fue estimar la producción de agua y la erosión en la subcuenca del río Tempisquito según la cobertura de la tierra actual, usando la interfase de QGIS de la herramienta de evaluación de suelos y aguas (QSWAT). La parametrización, análisis de sensibilidad y calibración del modelo se realizó con el algoritmo SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting), disponible en el programa SWAT-CUP. Después de la calibración, el modelo presentó un coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0,7, lo que se considera muy bueno. Para el periodo de calibración 2008 a 2013 se obtuvo una producción de agua de 1512,5 mm año⁻¹ que corresponde al 60,1% de la precipitación, la mayor producción de agua proviene de la parte alta de la subcuenca. La erosión media de la cuenca fue de 122,2 t ha⁻¹ año⁻¹, lo que se considera como severa. Los sitios con mayor erosión corresponden a las secciones de alta pendiente en las laderas del volcán Orosí. El caudal medio de la subcuenca es de 0,72 m³ s⁻¹, con un máximo en octubre (1,46 m³ s⁻¹) y un caudal mínimo en el mes de abril (0,32 m³ s⁻¹). Por su parte, la carga de sedimentos media estimada en la salida de la subcuenca fue de 473,84 t, el valor mínimo ocurre en el mes de abril (118,98 t), mientras que el máximo se registró en el mes de octubre (1333,4 t).

Palabras clave: QSWAT, SUFI-2, erosión, escorrentía, flujo lateral, flujo base.

ABSTRACT

Hydrological models are useful tools for predicting the impact of land use change, agricultural management practices and climate change at a basin scale. The objective of this work was to estimate water yield and erosion in the Tempisquito river sub-basin in accordance with the current land cover, for which the QGIS interface of the soil and water assessment tool (QSWAT) was used. Parameterization, sensitivity analysis and model calibration were performed with the SUFI-2 algorithm (Sequential Uncertainty Fitting) available in the SWAT-CUP program. After calibration, the model presented a Nash-Sutcliffe efficiency coefficient of 0.7, which is considered very good. For the time period evaluation, 2008 to 2013, a water production of 1512.5 mm year⁻¹ was obtained, which corresponds to 60.1% of the rainfall, the highest water yield occurs in the upper part of the sub-basin. The average erosion of the basin was 122.2 t ha⁻¹ year⁻¹, which is considered serious. The sites with the highest erosion correspond to sites of high slope on the hillside of the Orosí volcano. The average streamflow of the sub-basin is 0.72 m³ s⁻¹, with a maximum in October (1.46 m³ s⁻¹) and a minimum streamflow in the month of April (0.32 m³ s⁻¹), on the other hand, the average estimated sediment yield in the production of the sub-basin was 473.84 t, the

minimum value of sediment load occurs in April (118.98 t), while the highest value was registered in October (1333.4 t).

Key words: QSWAT, SUFI-2, erosion, runoff, lateral flow, base flow.

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos hidrológicos son herramientas valiosas utilizadas para analizar el efecto de prácticas de manejo en la calidad del agua, pero también pueden ser una herramienta útil para cuantificar su producción en una determinada cuenca y como respuesta a diferentes opciones de uso del suelo o diversos escenarios de manejo (Fohrer *et al.* 2001; Behera y Panda 2006; Ahl *et al.* 2008; Bieger *et al.* 2014). Además, el uso de modelos facilita la identificación de puntos críticos dentro de una cuenca hidrográfica donde se debe enfocar la implementación de medidas para mejorar el estado de los recursos hídricos (Chaubey *et al.* 2005; Di Luzio *et al.* 2005; Ullrich y Volk 2009).

Entre los numerosos modelos hidrológicos y de calidad del agua que se han desarrollado en los últimos años, la herramienta de Evaluación de Suelos y Aguas (SWAT, por sus siglas en inglés), es uno de los modelos más empleados para simular rendimientos de agua y sedimentos bajo uso del suelo y diferentes escenarios de manejo (Behera y Panda, 2006). El modelo SWAT es un modelo de simulación para cuencas hidrográficas, determinístico y distribuido desarrollado por el USDA Servicio de Investigaciones en Agricultura (Douglas-Mankin *et al.* 2010). Ha sido aplicado con éxito en las cuencas hidrográficas de todo el mundo, no solo para simulaciones hidrológicas, sino también para la evaluación del transporte de sedimentos y nutrientes en las mismas (Arnold y Fohrer 2005; Gassman *et al.* 2007; Dile *et al.* 2016).

El modelo SWAT fue desarrollado para evaluar los efectos de diversas alternativas de manejo sobre los recursos hídricos de grandes cuencas pluviales (Arnold *et al.* 2012), y ha ganado aceptación internacional como una herramienta de modelado interdisciplinario de cuencas a tal punto que actualmente se está utilizando en cerca de 100 países. SWAT se ha utilizado ampliamente para investigar problemas de contaminación del agua y fuentes de contaminación para una variedad de escalas y condiciones ambientales en todo el mundo (Gassman *et al.* 2007; Dile *et al.* 2016). También contribuye a comprender los ecosistemas complejos, así como la disponibilidad y calidad de agua, el cambio climático y los problemas de producción agrícola en todo el mundo (Dile *et al.* 2016).

La gran cuenca del río Tempisque es una zona sumamente importante de Costa Rica que cubre aproximadamente una novena parte de su territorio (Mateo-Vega 2001). Se ubica en la provincia de Guanacaste y está compuesta por las subcuencas Tempisque (3357,3 km²) y Bebedero (2047,3 km²), con una extensión total de 5404,6 km²; es la cuenca más grande de Costa Rica y abarca el 53% de Guanacaste (Gutiérrez *et al.* 1986). La superficie en áreas

protegidas es de 611 km² y reúne siete zonas de vida (Holdridge 1964), y seis zonas de transición, además de diferentes asentamientos humanos importantes (Mateo-Vega 2001).

A pesar de la importancia y de la extensión de la cuenca del río Tempisque, son pocos los estudios llevados a cabo sobre la misma: Newbold *et al.* (1995), estudiaron la concentración de solutos en seis ríos dentro de la cuenca; Guzmán y Calvo-Alvarado (2012), evaluaron la situación de los recursos hídricos de la cuenca alta mediante una descripción biofísica del área de estudio, así como el cálculo detallado de la disponibilidad y uso de los recursos hídricos; y hasta el momento, solamente es posible encontrar un trabajo sobre el desarrollo de modelos hidrológicos (Jiménez *et al.* 2015), que tiene que ver con la evaluación del comportamiento de los modelos hidrológicos, el Modelo Hidrológico de Cambio de Uso del Suelo (HYLUC en inglés) y del modelo Nedbør-Afstrømnings (NAM en inglés), en las subcuencas de los ríos Tempisquito (dentro de la Cuenca Tempisque) y Cucaracho (vertiente Caribe).

Ante esta situación, el objetivo de este trabajo fue evaluar y calibrar el Modelo SWAT para estimar la producción de agua de la subcuenca del río Tempisquito según la cobertura de la tierra actual empleando datos hidrometeorológicos medidos para el periodo 2008 y 2013. Este estudio permite contar con información actual sobre la producción de agua de la subcuenca y es el primero realizado utilizando el modelo de SWAT para esta estimación de la subcuenca.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

2.1 Área de estudio

La subcuenca del río Tempisquito se encuentra dentro del Parque Nacional Guanacaste (PNG), 34 km al norte de la ciudad de Liberia, Guanacaste, Costa Rica (Figura 4). Se ubica entre las coordenadas CRTM05 (329476-340867) y (1204608-1213188); el área delimitada tiene una extensión de 14,29 km² y es parte de la cuenca del río Tempisque, la cual drena sus aguas al golfo de Nicoya.

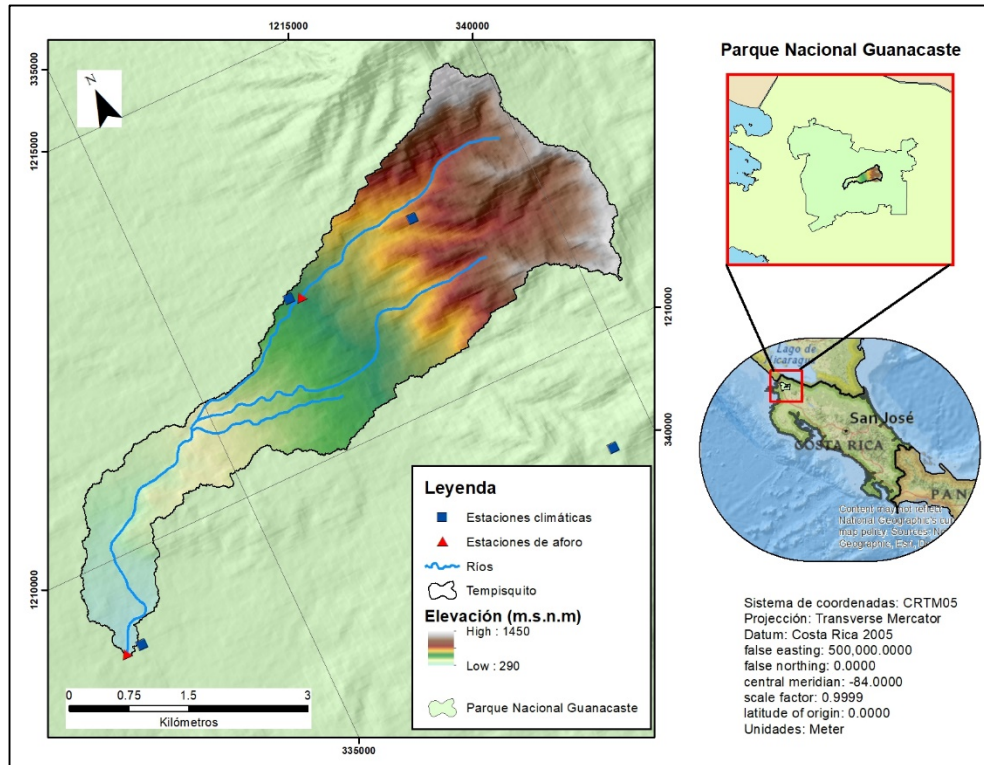


Figura 4. Ubicación de la subcuenca del río Tempisque, Guanacaste, Costa Rica

El PNG fue por muchas décadas, ocupado por la ganadería, donde las prácticas comunes eran las quemadas anuales de pastos introducidos (Kalacska *et al.* 2004; Calvo-Alvarado *et al.* 2009), especialmente jaragua (*Hyparrhenia rufa*). Actualmente la cobertura del parque es un mosaico de varios estadios de sucesión, desde bosques secos transicionales en las zonas bajas hasta bosques siempre verdes poco intervenidos en las partes altas, cercanas a los volcanes Orosí y Cacao (Figura 5). El rango de elevaciones de la subcuenca va de los 291 a los 1450 metros sobre el nivel del mar.



Figura 5. Panorámica de la subcuenca del río Tempisque con los volcanes Orosí y Cacao al fondo

De acuerdo con el Sistema de Zona de Vida de Holdridge (1964), las zonas de vida presentes en la subcuenca del río Tempisquito son: bosque húmedo tropical (Bh-T), bosque húmedo tropical transición premontano (Bh-T»P), bosque muy húmedo premontano (Bmh-P), bosque pluvial premontano (Bp-P) y bosque pluvial montano bajo (Bp-MB). En cuanto a los suelos del sitio, la totalidad de la subcuenca se encuentra en suelos del orden Andisol (Fallas 2014). En el año 2012, el 95% de la subcuenca tenía cobertura forestal, específicamente bosques maduro, secundario y deciduo; el resto del área corresponde a remanentes de pastos (SIREFOR 2014).

Desde 1989, el Stroud Water Research Center (SWRC), conduce una investigación de largo plazo sobre biología ambiental en el PNG (SWRC 2016). A partir del 2007, el Instituto Tecnológico de Costa Rica en conjunto con el SWRC, llevan a cabo el monitoreo hidrometeorológico de varias microcuencas ubicadas dentro del Área de Conservación Guanacaste (ACG). Así es como se recolectan datos de temperatura, humedad relativa, precipitación y niveles de agua en varios ríos y quebradas dentro del área de estudio.

2.2 Línea base de la producción de agua y erosión

Se estimó la producción de agua y la erosión mensual del periodo mayo 2008 – abril 2013 en la subcuenca del río Tempisquito. Para este estudio se utilizó la extensión QSWAT 1.4, versión de SWAT para el programa de sistemas de información geográfica QGIS 2.6.1 (Dile *et al.* 2016). El modelo SWAT simula el ciclo hidrológico basándose en la ecuación de balance de agua (Neitsch *et al.* 2011).

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

Donde:

SW_t = contenido final de agua en el suelo (mm)

SW_0 = contenido inicial de agua en el suelo diario (mm)

t = tiempo en días

R_{day} = precipitación diaria (mm)

Q_{surf} = escorrentía superficial diaria (mm)

E_a = evapotranspiración diaria (mm)

W_{seep} = cantidad de agua que se infiltra en el suelo diariamente (mm)

Q_{gw} = flujo de retorno diario (mm)

La producción de sedimento fue calculada con la ecuación universal de pérdida de suelos modificada (Williams y Berndt 1977; Da Silva *et al.* 2016).

$$Y = 11,8 (Q_{sup} + q_{pico} + \text{Área}_{hrru})^{0,56} * K * LS * C * P * CFRG$$

Donde:

Y	= producción de sedimento después de un evento de lluvia (ton).
Q_{sup}	= escorrentía superficial (mm)
q_{pico}	= caudal pico ($m^3 s^{-1}$)
Área_{hru}	= área de la unidad de respuesta hidrológica (ha)
K	= factor de erodabilidad del suelo ($(0,013\text{ton}^{-1} m^2 h) / (m^3 \text{ton cm})$)
LS	= factor topográfico (adimensional)
C	= factor de uso del suelo (adimensional)
P	= factor de prácticas de conservación de suelos (adimensional)
$CFRG$	= factor de fragmentación de la tierra (adimensional)

El modelo SWAT hace la simulación en tres pasos: el primero corresponde a la delimitación de la cuenca, para lo cual se necesita un MED del área en estudio; un insumo adicional es la red hídrica, aunque sino se cuenta con ella, el programa calcula una red de drenaje. El segundo paso es la conformación de HRUs; los insumos son capas en formato ráster de suelos y de uso del suelo y la pendiente que es extraída por el programa a partir del MED. El último paso es la simulación, donde se ingresan los datos climáticos diarios del periodo de estudio. Finalmente, sí se cuenta con datos de salidas de la cuenca, se puede calibrar el modelo inicial (Figura 6). El modelo calibrado corresponde a la línea base de la producción de agua y erosión para la subcuenca del río Tempisquito.

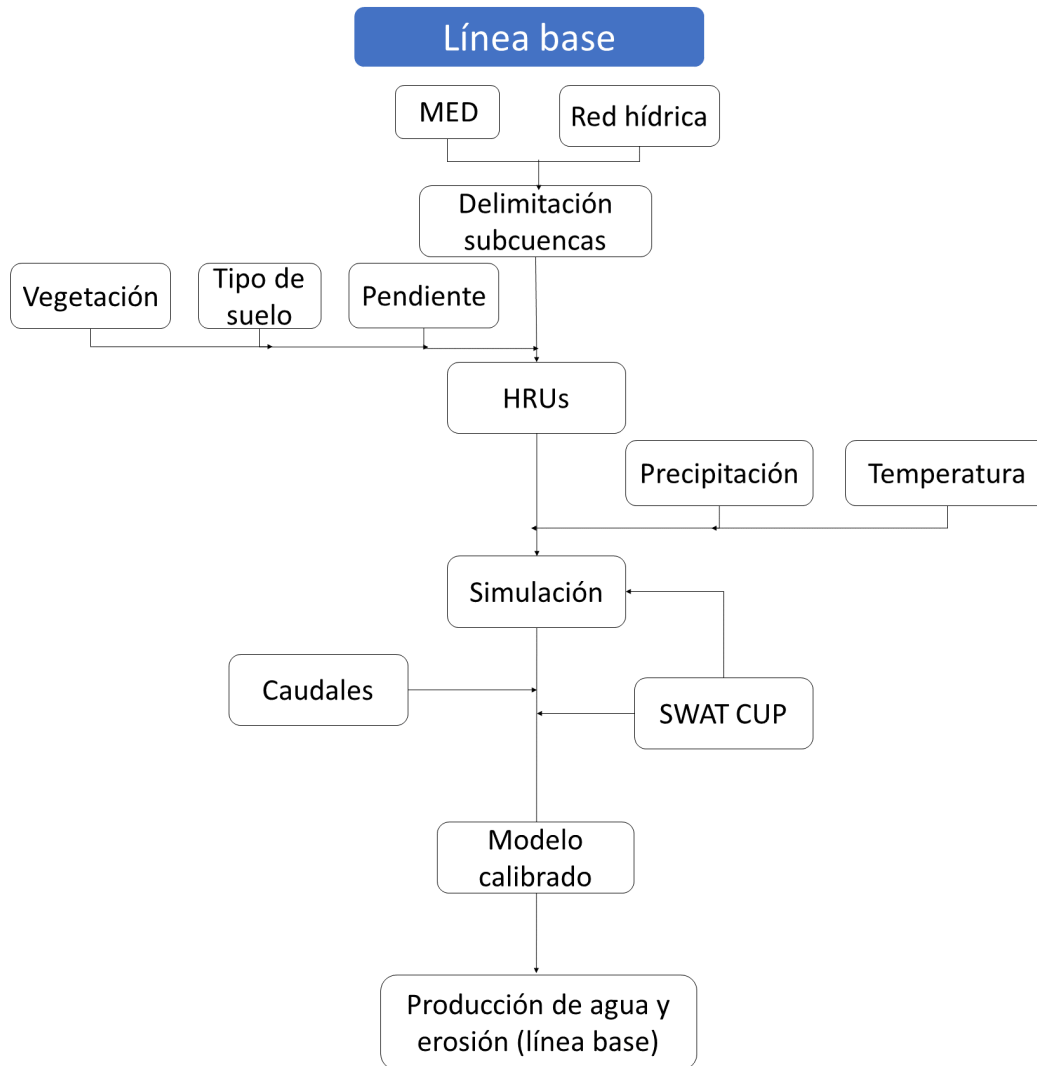


Figura 6. Flujograma que representa la modelación en SWAT para la línea base de producción de agua y erosión en la subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica

2.3 Delimitación de la subcuenca

Inicialmente la subcuenca se delimitó con el delineador automático de QSWAT 1.4 a partir del punto aforo conocido como Tempisquito Orosí; sin embargo, se observaron irregularidades en la delimitación de la misma con respecto a la capa de ríos 1:50000, por lo que se procedió a una nueva delimitación con la extensión ArcSWAT en el programa ArcGIS 10.3 (Figura 7). Una vez delimitada la subcuenca, se procedió a la corrida del modelo en QSWAT.

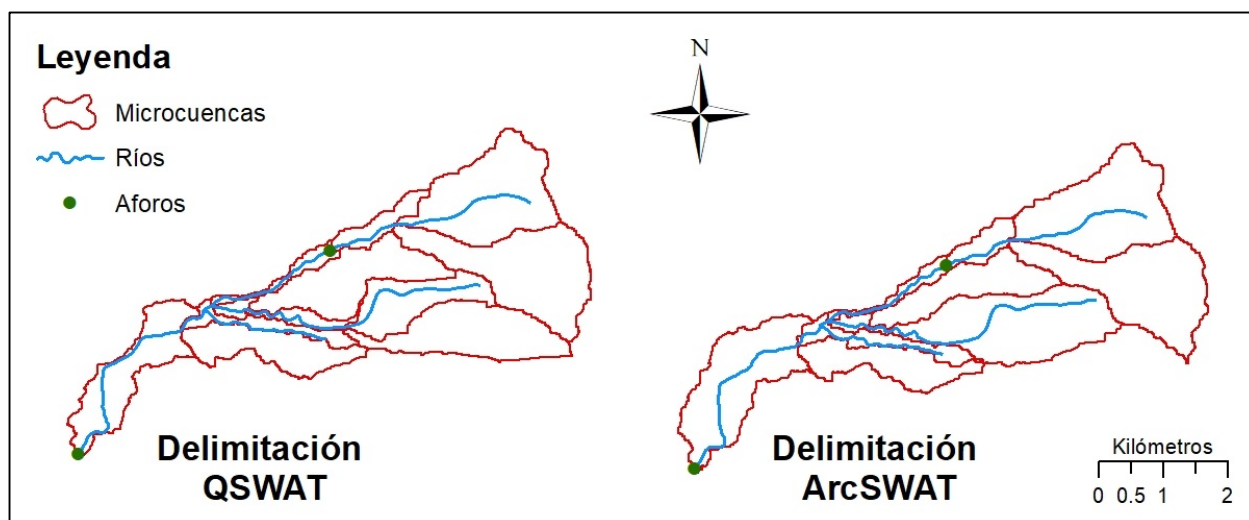


Figura 7. Delimitación de la subcuenca del río Tempisque con las extensiones QSWAT 1.4 y ArcSWAT 2012. Guanacaste, Costa Rica

2.4 Datos de entrada del modelo SWAT

Los datos de precipitación diaria se obtuvieron de cuatro pluviómetros (Hobo Onset Data Logging Rain Gauge model RG3-M), instalados en estaciones meteorológicas dentro y fuera de la subcuenca: Cacao (1123 msnm), Cumbre (796 msnm), Maritza (580 msnm) y Tempisque Orosí (291 msnm). Los datos de temperatura máxima y mínima diaria provienen de sensores de temperatura (HOBO Onset U23 Pro v2-U23-001), ubicados en las estaciones anteriormente citadas. Tanto los pluviómetros como los sensores de temperatura registraron datos cada 30 minutos. Los datos de radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento fueron simulados por el programa QSWAT.

La información de suelos se obtuvo a partir de un mapa de suelos escala 1:200000 suministrado por el área de conservación (ACG 2012). Este mapa se rasterizó a una resolución de 12,5 metros. El modelo necesita información adicional de suelos, cuyos datos se tabularon en una tabla de usuario con información fisicoquímica de los suelos presentes (Winchell *et al.* 2013). La información requerida por el modelo SWAT se presenta en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Parámetros fisicoquímicos de suelo requeridos por el modelo SWAT

Parámetro SWAT	Descripción
HYDGRP	Grupo hidrológico de suelo
SOL_ZMX	Profundidad máxima del suelo con presencia de raíces
ANION_EXCL	Fracción de porosidad desde donde los aniones son excluidos
SOL_CRK	Potencial o máximo rompimiento del perfil de suelo expresado como fracción del total de volumen de suelo
SOL_Z	Profundidad de cada horizonte desde la superficie

Parámetro SWAT	Descripción
SOL_BD	Densidad aparente de cada horizonte
SOL_AWC	Capacidad de disponibilidad de agua en cada horizonte
SOL_K	Conductividad hidráulica en cada horizonte
SOL_CBN	Contenido de carbono orgánico en cada horizonte
SOL_ALB	Albedo del suelo húmedo en cada horizonte
SOL_EC	Conductividad eléctrica en cada horizonte
USLE_K	Factor de erodabilidad del suelo para cada horizonte
CLAY	Porcentaje de arcilla por horizonte
SILT	Porcentaje de limo por horizonte
SAND	Porcentaje de arena por horizonte
ROCK	Porcentaje de rocas por horizonte
SOL_CAL	Contenido de carbonato de calcio por horizonte
SOL_PH	pH para cada horizonte

Para obtener los datos indicados en el Cuadro 6, se caracterizaron seis perfiles de suelo donde se midió la profundidad de cada horizonte, se determinó el contenido de piedras por perfil, se evaluó el color del suelo de cada perfil con ayuda de una tabla Munsell (Soil Survey Staff 1993), y se tomaron muestras de suelo para evaluar textura, pH, fertilidad y carbono orgánico por perfil. Los análisis se realizaron en el laboratorio de suelos del CATIE.

La densidad aparente, conductividad hidráulica y disponibilidad de agua fue determinada con el programa SPAW Hydrology (Saxton y Rawls 2006; Morales 2014), a partir de datos de textura y de porcentaje de materia orgánica. El grupo hidrológico de suelo se calculó con el programa NUMCUR utilizando también datos de textura. El albedo del suelo se calculó con los datos de color de suelo y la tabla Munsell; para ello se utilizó la fórmula siguiente:

$$Albedo = 0,069 * (color\ value) - 0,0114$$

El factor K de erodabilidad del suelo se estimó con la siguiente ecuación:

$$K_{usle} = \frac{0,00021 * M^{1,14} * (12 - OM) + 3,25 * (C_{soilstr} - 2) + 2,5 * (C_{perm} - 3)}{100}$$

Donde

K_{usle} = factor de erodabilidad del suelo

M = parámetro del tamaño de las partículas

OM = porcentaje de materia orgánica

$C_{soilstr}$ = código de la estructura de suelo en la clasificación del suelo

C_{perm} = perfil de las clases de permeabilidad

Los datos de uso del suelo se obtuvieron a partir del mapa de tipos de bosque de Costa Rica 2012 (SIREFOR 2014). Esta información se rasterizó a un tamaño de píxel de 12,5 metros, además se eliminaron las nubes mediante una digitalización y se reclasificó según la nomenclatura de usos de suelo de SWAT (Figura 8).

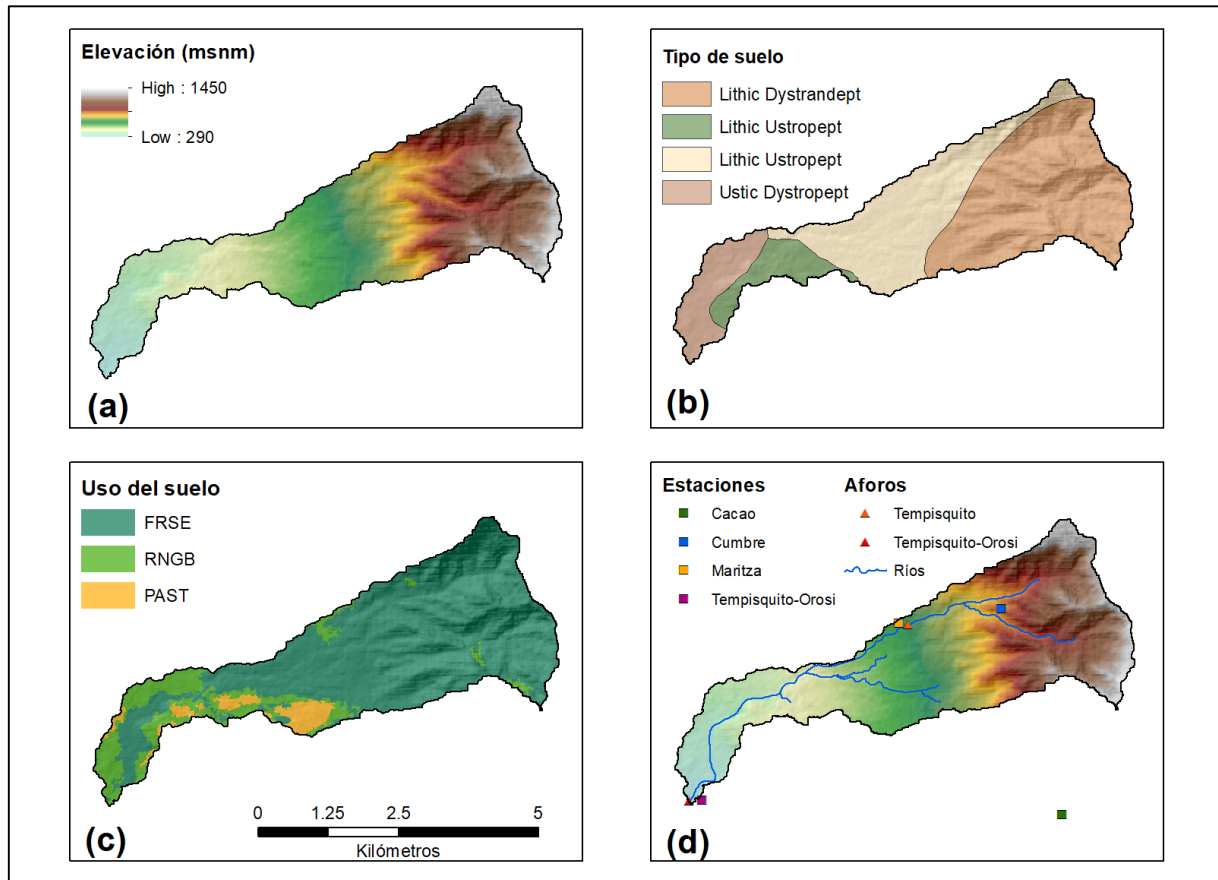


Figura 8. Datos de entrada del modelo SWAT para la delimitación de las microcuencas, creación de HRUs y ubicación de estaciones meteorológicas: (a) modelo de elevación digital, (b) mapa de suelos, (c) mapa de cobertura y (d) estaciones meteorológicas utilizadas y puntos de aforo, subcuenca del río Tempisqueito, Guanacaste, Costa Rica

El MED usado para este trabajo fue descargado del portal de la Alaska Satellite Facility, el cual es producto de la misión ALOS, lanzado por la Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial (JAXA) entre los años 2006 y 2011; la resolución espacial es de 12,5 m; está radiométricamente corregido y la información fue obtenida mediante la banda L del sensor PALSAR (ASF 2016).

Las pendientes de la subcuenca se extrajeron de este mismo MED; se utilizó la clasificación de pendientes de FAO para ingresar las mismas al modelo (FAO 2009). Finalmente, los datos de la red hídrica de la subcuenca fueron obtenidos del Atlas digital 2014, digitalizados a partir de las hojas cartográficas de Costa Rica, escala 1:50000 (Fallas 2014).

2.5 Variables por defecto a modificar y periodo de calentamiento

El método de evapotranspiración potencial que SWAT usa por defecto es el de Penman-Monteith; sin embargo, al solo disponer de datos de precipitación y temperatura, el método idóneo para la simulación es el de Hargreaves. Otro parámetro a modificar es el almacenamiento inicial de agua en el suelo (FFCB); este valor es expresado como una fracción del contenido a capacidad de campo y varía entre 0 a 1, donde 0 representa un suelo completamente seco y 1 un suelo anegado. En el caso de esta simulación se utilizó un valor de 0,6 (Arnold *et al.* 2012).

Aunque los datos climáticos de entrada son diarios, todas las simulaciones se hicieron mensuales debido a que para que SWAT realice la simulación diaria, se requiere de mucha memoria y el equipo de cómputo utilizado para las simulaciones no contaba con la memoria suficiente.

El modelo SWAT necesita un periodo de calentamiento o de equilibrio (NYSKIP). Arnold *et al.* (2012), mencionan que para largos periodos de simulación, la selección de un periodo de calentamiento es opcional. Sin embargo, para periodos cortos este periodo es necesario. El periodo de calentamiento no se contabiliza en la simulación pues solo se cuentan con 5 años de datos; entonces, para no perder años de simulación en el calentamiento, se procedió a duplicar los primeros 3 años de datos, de manera tal que se pudo usar un periodo de calentamiento de 3 años para la simulación.

2.6 Calibración

Para calibrar el modelo se utilizó la información de la base de datos del Instituto Tecnológico de Costa Rica¹⁰ de dos niveles Solinst Levellogger Gold Model 3001, ubicados en estaciones de aforo dentro de las subcuencas Maritza y Tempisque-Orosí. Los datos fueron registrados a intervalos de 5 minutos y se corrigieron con un barómetro ubicado en cada estación. Debido a la falta de trampas de erosión o de sedimentos dentro de la subcuenca, no fue posible realizar la calibración de la erosión.

Los niveles registraron la altura de la columna de agua; para convertir las alturas de nivel de agua a caudal, se utilizaron datos de aforos instantáneos realizados durante el periodo de medición, así se ajustaron ecuaciones de caudal para cada estación. Las ecuaciones nivel-caudal de cada uno de los puntos de aforo, el coeficiente de determinación y el número de aforos usados para cada ajuste se presentan a continuación:

¹⁰ Proyectos de investigación desarrollados por la Escuela de Ingeniería Forestal, Programa de Manejo de Recursos Naturales del Instituto Tecnológico de Costa Rica. Dr. Julio Calvo-Alvarado, investigador principal.

Maritza

$$Q = 0,0342e^{0,0666*L} \quad R^2 = 0,73 \quad n = 49$$

Tempisquito-Orosí

$$Q = 0,0275e^{0,0528*L} \quad R^2 = 0,76 \quad n = 28$$

Donde

Q = caudal en $m^3 s^{-1}$

L = altura de la columna de agua en cm

R^2 = coeficiente de determinación

n = número de aforos utilizados para el ajuste

La parametrización, análisis de sensibilidad y calibración del modelo se realizó con el algoritmo SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting), disponible en el programa SWAT-CUP 5.1.6.2. Con SUFI-2 se pueden manejar varios parámetros de manera simultánea (Abbaspour *et al.* 2004); este algoritmo cuantifica diversas incertidumbres tanto de los parámetros, datos de entrada o del modelo. SUFI-2 representa las incertidumbres de entrada como una distribución uniforme; las incertidumbres de salida son cuantificadas como una banda de predicción del 95% de la incertidumbre. Esta variable de salida se obtiene mediante el muestreo de hipercubo latino (Rostamian *et al.* 2008).

Para evaluar la eficiencia del modelo se utilizó como función objetivo el coeficiente de eficiencia de Nash Sutcliffe (NSE); este coeficiente explica que tan bien encajan los datos simulados contra los observados (Nash y Sutcliffe 1970; Moriasi *et al.* 2007). Además, se estimaron otros coeficientes complementarios como el de determinación (R^2), el coeficiente de Kling-Gupta (KGE) y el porcentaje de sesgo (PBIAS). Estos coeficientes son unos de los normalmente utilizados para medir la bondad de ajuste entre los flujos observados y simulados (Gupta *et al.* 1999; Spruill *et al.* 2000; Moriasi *et al.* 2007; Gupta *et al.* 2009).

Los parámetros iniciales de calibración se seleccionaron a partir de una revisión de literatura de parámetros comúnmente utilizados en la calibración de caudal (Rostamian *et al.* 2008; Ghaffari *et al.* 2010; Singh *et al.* 2013; Abbaspour *et al.* 2015). Los rangos de los parámetros fueron dados por defecto por el programa SWAT-CUP (Cuadro 7). Abbaspour *et al.* (2007), recomiendan usar rangos lo más grande posibles pero que sean físicamente significativos.

Cuadro 7. Parámetros iniciales y sus rangos para la calibración de SWAT-CUP en los puntos de aforo de la subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica

Parámetro	Descripción	Rango inicial	Rango final
r__CN2.mgt	Número de curva para condición de humedad II	-0,2	0,2
v__ALPHA_BF.gw	Factor alfa de la curva de recesión de agua subterránea del acuífero profundo (1/días)	0	1
v__GW_DELAY.gw	Tiempo de retardo del agua subterránea (días)	30	450
v__GWQMN.gw	Umbral de profundidad del agua en el acuífero bajo requerido para que ocurra el flujo de retorno (mm H ₂ O)	0	2
v__CH_K2.rte	Conductividad hidráulica efectiva en el aluvión del canal principal (mm/h)	-0,01	500
v__CH_N2.rte	Coeficiente "n" de Manning para el canal principal	-0,01	0,3
v__EPCO.hru	Factor de compensación de absorción de plantas	0	1
v__ESCO.hru	Factor de compensación de evaporación del suelo	0	1
v__GW_REVAP.gw	Coeficiente "revap" de aguas subterráneas (agua extraída del acuífero por evaporación o plantas con raíces profundas)	0,02	0,2
v__OV_N.hru	El valor "n" de Manning para el flujo terrestre	0,01	30
v__RCHRG_DP.gw	Fracción de percolación del acuífero profundo	0	1
v__REVAPMN.gw	Umbral de profundidad del agua en el acuífero poco profundo para "revap" o percolación al acuífero profundo (mm H ₂ O)	0	500
v__SOL_AWC().sol	Capacidad de agua disponible en el suelo, (mm H ₂ O/mm de suelo)	0	1
r__SOL_BD().sol	Densidad aparente del suelo (g/cm ³)	0,9	2,5
r__SOL_K().sol	Conductividad hidráulica saturada (mm/h)	0	2000
r__SURLAG.bsn	Coeficiente de retraso de escorrentía superficial	0,05	24

Se realizaron varias iteraciones de 500 y 2000 simulaciones, mediante la opción de procesos paralelos de SWAT-CUP, que permite hacer simulaciones paralelas en cada uno de los núcleos del procesador, reduciendo el tiempo de simulaciones (Rouholahnejad *et al.* 2012).

3. RESULTADOS

3.1. Simulación inicial

La simulación inicial de QSWAT subdividió la subcuenca del río Tempisquito en 10 microcuencas y 164 HRUs. La precipitación media del periodo para la subcuenca es de 2516,5 mm y la evapotranspiración real de 760,3 mm. Por otra parte, la escorrentía superficial es de 772,5 mm, el flujo lateral de 298,8 mm y el flujo de retorno de 699,6 mm, este último corresponde al flujo base promedio de la cuenca (Figura 9). Todos estos valores corresponden a los componentes del balance hídrico antes de la calibración.

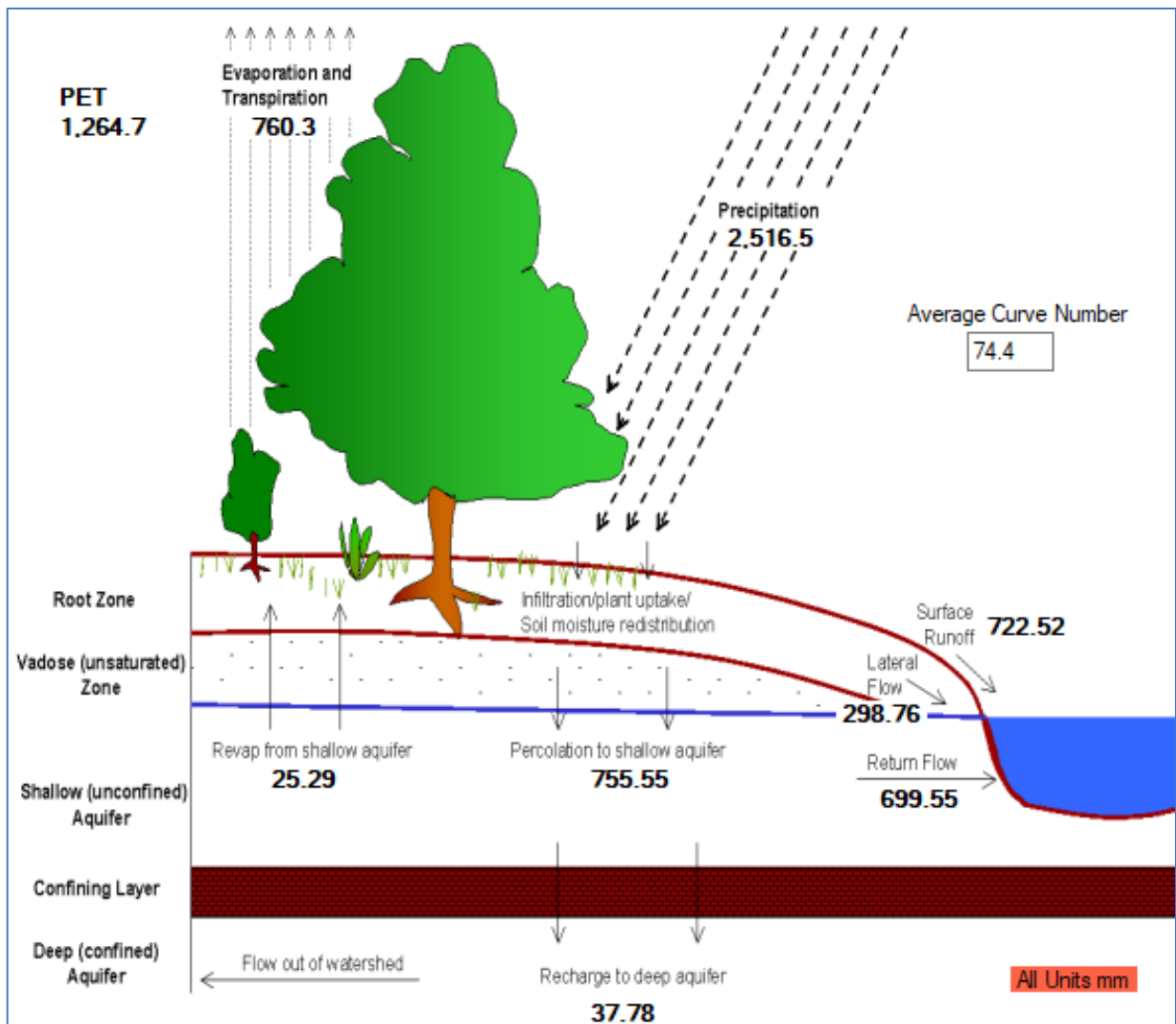


Figura 9. Componentes del balance hídrico según la simulación inicial de QSWAT, subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica

En la Figura 10 se muestra el caudal estimado y observado en los puntos de aforo Maritza (microcuenca 2) y Tempisquito-Orosí (microcuenca 10), y su respectivo coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE). Este coeficiente tiene un rango de valores desde $-\infty$ y 1. En ambas gráficas se observa una sobreestimación en los caudales simulados con respecto a los observados, principalmente en los caudales pico. Según Foglia *et al.* (2009), la microcuenca 2 presenta un ajuste inicial insuficiente, mientras que la microcuenca 10 muestra un ajuste suficiente, aun sin calibrar, lo cual posiblemente se debe a que la subcuenca del Tempisquito es poco intervenida.

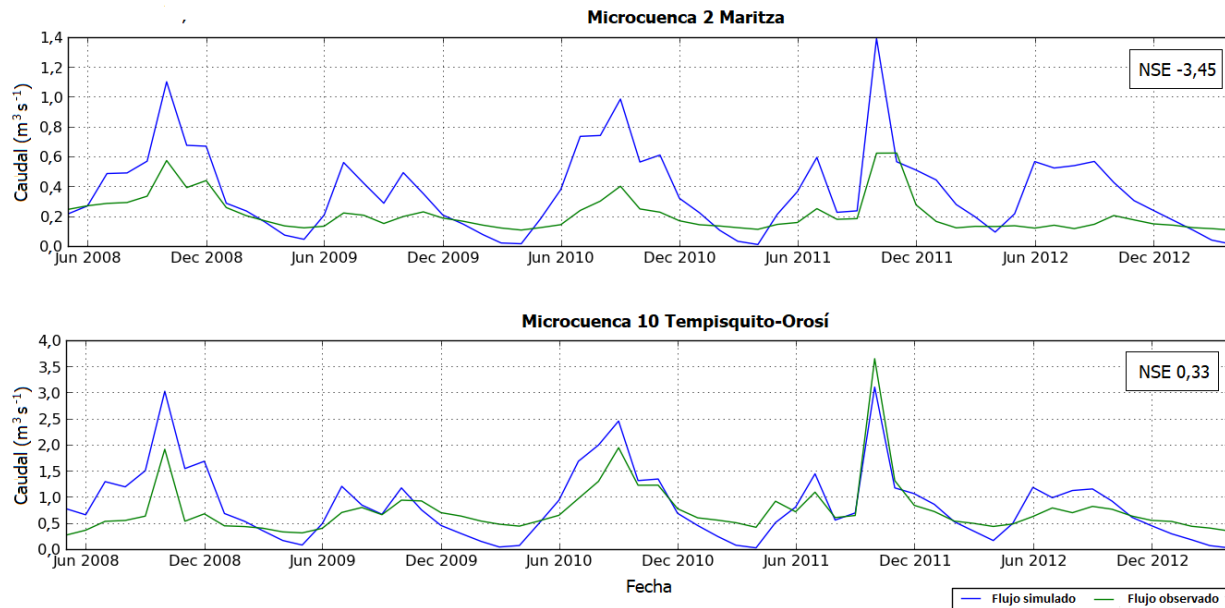


Figura 10. Caudal estimado y observado en los puntos de aforo ubicados a la salida de las microcuencas Maritza (2) y Tempisquito-Orosí (10), subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica

3.2 Calibración

La calibración se realizó en las microcuencas mencionadas anteriormente, con los datos de caudal mensual obtenidos a partir de mediciones sub-diarias de nivel de agua y de aforos instantáneos. Los sedimentos no se pudieron calibrar debido a la falta de datos observados; sin embargo, se esperan resultados coherentes de la simulación de sedimentos ya que SWAT presenta resultados aceptables aun sin calibración (Di Luzio *et al.* 2005).

De los 14 parámetros seleccionados inicialmente para el análisis de sensibilidad, solamente se utilizaron 6 para la calibración, siendo estos los más sensibles. El Cuadro 8 muestra los parámetros más sensibles, su valor ajustado además de rangos máximos y mínimos; el ajuste de estos parámetros modifica los valores de caudal en los puntos de aforos, obteniéndose de esta manera un mejor ajuste entre los caudales observados y los estimados por el modelo.

Cuadro 8. Parámetros utilizados para la calibración del caudal en el modelo SWAT

Nombre del parámetro	Valor ajustado	Valor mínimo	Valor máximo
1:R__CN2.mgt	-0,196458	-0,353074	-0,146184
2:V__ALPHA_BF.gw	0,319249	0,059927	0,528863
3:V__GW_DELAY.gw	284,883881	195,591339	296,715393
4:V__ESCO.hru	0,289237	-0,011546	0,466646
5:V__GW_REVAP.gw	0,095071	0,094712	0,214236
6:V__SOL_AWC(..).sol	0,106235	-0,236724	0,151678

Después de correr en SWAT-CUP varias iteraciones de 500 y de 2000 simulaciones, ajustando cada vez el rango de los parámetros, se obtuvieron los estadísticos finales de ajuste de las calibraciones en las microcuencas consideradas (Cuadro 9). El NSE aumentó en ambas; en la microcuenca 2 el ajuste pasó de ser insuficiente (-3,45), sin calibrar a suficiente (0,22), después de la calibración. En la microcuenca 10 también se dio una mejora en el ajuste, el cual pasó de suficiente (0,33), antes de la calibración a un ajuste muy bueno (0,70), una vez realizada la calibración.

Cuadro 9. Estadísticos de ajuste para los puntos de aforo de las microcuencas Maritza (microcuenca 2) y Tempiquisto-Orosí (microcuenca 10), subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica

Estadístico	Microcuenca 2	Microcuenca 10
Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)	0,22	0,7
Eficiencia de Kling-Gupta (KGE)	0,43	0,76
Porcentaje de sesgo (PBIAS)	0,9	0,4
Coefficiente de determinación (R^2)	0,26	0,69
p-factor	1,00	0,53
r-factor	3,62	0,39

El estadístico KGE es una mejora propuesta por Gupta *et al.* (2009), al NSE. El KGE permite una menor subestimación de picos que NSE. El valor óptimo es 1 y es la microcuenca 10 la que presenta el valor más alto (0,76), indicando un mejor ajuste. El PBIAS mide la tendencia promedio que los flujos simulados sean mayores o menores que los observados; su valor óptimo es 0. En este caso ambos porcentajes de sesgo son positivos, lo que supone una subestimación de los flujos simulados después de la calibración, la cual es menor en la microcuenca 10 (Gupta *et al.* 1999). De igual manera esta microcuenca presenta un coeficiente de determinación mayor, lo que determina un mejor ajuste.

La bondad de ajuste del modelo se evalúa mediante la banda de predicción de incertidumbre del 95%. Dos indicadores que explican la incertidumbre del modelo son p-factor y r-factor; el primero tiene un valor óptimo de 1 e indica el porcentaje de datos medidos incluidos en la banda de incertidumbre de la predicción del 95% (95PPU), mientras que el segundo, con un valor óptimo de 0, representa el ancho de banda 95PPU. En otras palabras, la incertidumbre del modelo (Abbaspour 2015).

En la microcuenca 2 se obtuvo un p-factor de 1; sin embargo, el r-factor es muy distante de cero (3,62). La razón de que el p-factor sea el óptimo es que la banda de predicción es tan ancha que todos los valores observados caen dentro de la incertidumbre del 95% (Abbaspour *et al.* 2007; Abbaspour *et al.* 2015). La Figura 11 muestra el caudal observado, la mejor simulación y su banda 95PPU para la calibración de la salida de la microcuenca 10; aquí el p-factor (0,53) y el r-factor (0,39), se encuentran más equilibrados, muestra de una buena calibración del modelo. Por las razones anteriormente expuestas, se decidió calibrar el modelo únicamente con los parámetros de salida de la subcuenca.

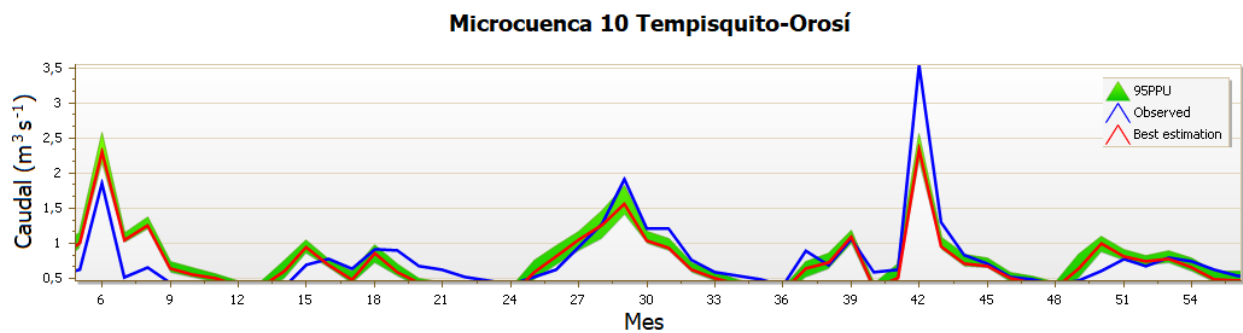


Figura 11. Caudal simulado, observado y banda de predicción PPU95% para la microcuenca Tempisquito-Orosí, subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica

3.3 Producción de agua

Una vez calibrado el modelo, se obtuvo una producción de agua en la subcuenca del río Tempisquito de 1512,5 mm, lo que corresponde a un 60,1% de la precipitación. Esta producción de agua está compuesta por la escorrentía superficial (403,5 mm), flujo lateral (313,0 mm) y el flujo de retorno (796,0 mm). Las microcuencas 1, 3 y 7 son las que tienen mayor producción de agua; todas ellas se encuentran en la parte alta de la subcuenca, donde la precipitación anual es de 2850,0 mm. La menor producción de agua se registra en la microcuenca Tempisquito-Orosí (10), donde la precipitación anual es de 1920,0 mm.

En la Figura 12 se puede apreciar cada uno de los componentes involucrados en la producción de agua dentro de la subcuenca del río Tempisquito. La escorrentía superficial (403,5 mm) y el flujo lateral (313,0 mm), representan el 26,6% y 20,6% de la precipitación respectivamente. La

máxima escorrentía superficial se da en la parte media de la subcuenca mientras que el máximo flujo lateral ocurre en la parte alta, en ambos mapas se observa una clara división en los valores máximos que corresponde a la clasificación de suelos. Entonces, al parecer las características edáficas, más que la precipitación, están determinando la cantidad de agua que escurre superficial y sub-superficialmente.

La percolación (964,9 mm) y el flujo de retorno (796,0 mm), tienen una distribución similar a lo largo de toda la subcuenca, debido a que el flujo de retorno proviene de la percolación y representa el 82,5% de la misma. El resto de la percolación recarga el acuífero profundo o está disponible para la evapotranspiración en el acuífero superficial (Neitsh *et al.* 2011).

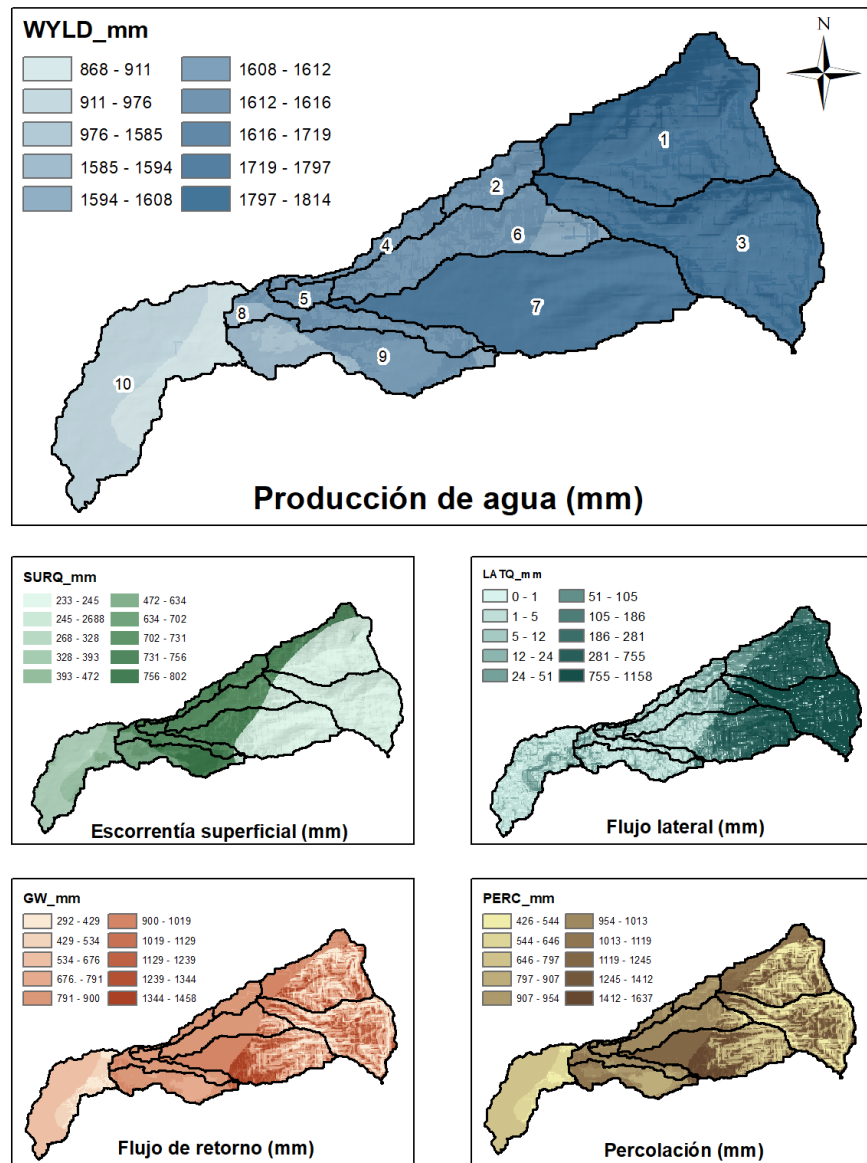


Figura 12. Producción de agua y sus componentes en la subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica

3.4 Erosión

La erosión media de la subcuenca del río Tempisquito es de $122,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, siendo clasificada como severa (FAO-PNUMA-UNESCO, 1980). Los porcentajes de erosión por categoría son los siguientes: leve 8,3%, moderada 15,3%, severa 59,8% y muy severa con 16,6% (Figura 13). A nivel de microcuencas, la microcuenca (1) es la que aporta más erosión ($258 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), mientras que (10), es la que reporta menos pérdida de suelo ($38 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$).

Como se indicó anteriormente, el 95% de la subcuenca se encuentra cubierta de algún tipo de vegetación arbórea. En el caso de la microcuenca 1, toda su área se encuentra cubierta de bosque maduro, mientras que solo el 34% de la microcuenca Tempisquito-Orosí (10), presenta ese tipo de cobertura. En términos de vegetación se esperaría que áreas totalmente cubiertas de bosque produzcan menos erosión, pero este no es el caso de las microcuencas mencionadas. Una variable que si puede explicar la diferencia de pérdidas de suelo entre microcuencas es la pendiente; en la microcuenca 1, la pendiente media es de 49,47%, mientras que en la 10 la pendiente es de apenas 9,92%. Entonces, la pérdida de suelo por erosión, más que por la cobertura, está determinada por la pendiente.

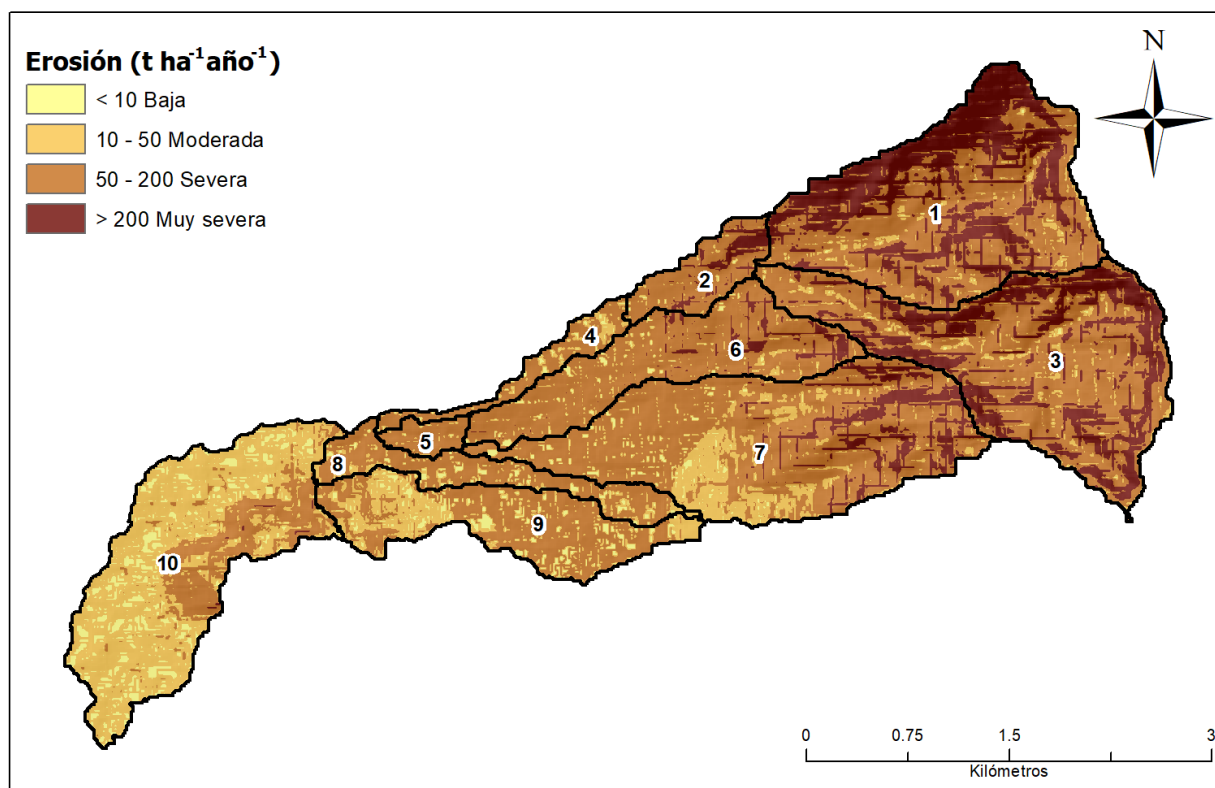


Figura 13. Pérdidas de suelo por erosión en la subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica

3.5 Caudal y descarga de sedimento mensual

Para el periodo comprendido entre mayo del 2008 y abril del 2013 se estimó el caudal medio mensual y la descarga mensual de sedimentos suspendidos, ambos a la salida de la subcuenca. El caudal medio mensual para el periodo es de $0,72 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; el mes con más caudal es octubre ($1,46 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), mientras que al final de la estación seca (abril), el caudal promedio es de apenas $0,32 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. La descarga de sedimentos promedio para el periodo fue de 473,84 t, los valores máximos y mínimos promedios se dieron en los mismos meses que el caudal, l octubre 1333,4 t y abril 118,98 t.

La tendencia del caudal y de la descarga de sedimentos es similar, debido a que el caudal es el medio de transporte del sedimento suspendido; entonces, entre mayor sea el caudal, mayor es la cantidad de sedimentos y viceversa. Otro factor que influye en la distribución temporal del caudal y los sedimentos es la cantidad de precipitación ocurrida en un determinado periodo. Octubre es el mes más lluvioso de todo el periodo (416,24 mm); en los años 2008 y 2011 se dieron dos picos de precipitación en este mes: 740,41 mm y 810,96 mm respectivamente. Esto trajo un aumento en el 2008 de un 62,04% del caudal y un 70,99% en los sedimentos suspendidos. Para el 2011, el aumento fue de 73,66% para el caudal y 109,24% en los sedimentos con respecto al promedio de octubre (Figura 14).

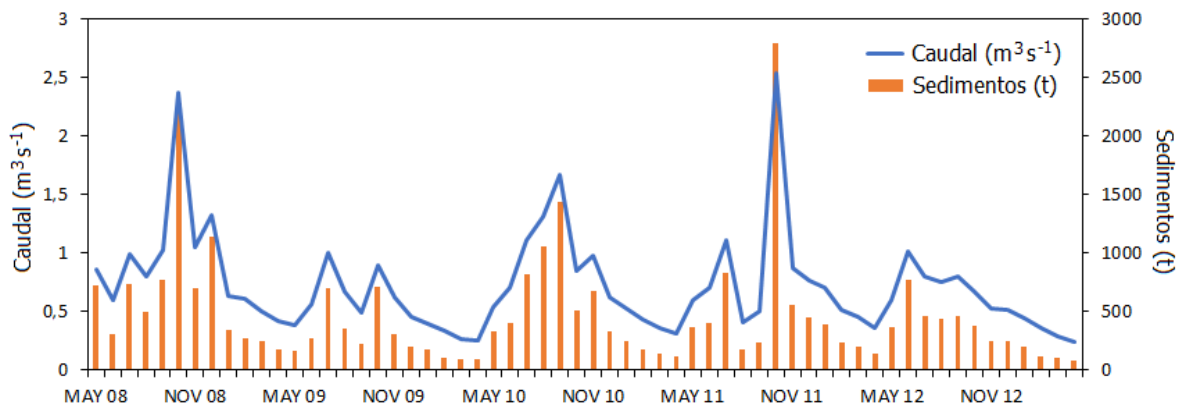


Figura 14. Caudal medio mensual y carga de sedimentos mensuales a la salida de la subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica

4. DISCUSIÓN

4.1 Calibración del modelo

De los dos puntos de aforo utilizados inicialmente para la calibración del modelo, solamente se utilizó la salida de la cuenca (Tempisquito-Orosí); el otro punto de aforo (Maritza), ubicado en el mismo río aguas arriba se descartó debido a su inadecuado ajuste. En una simulación realizada

por Jiménez *et al.* (2015), en el punto de aforo Maritza, los autores citan que factores como un complejo sistema subterráneo y la dificultad de obtener un correcto valor de precipitación para toda la cuenca, dificultaron el adecuado ajuste entre caudales estimados y observados. Otros factores observados en el sitio como altas pendientes y la dificultad de tener un óptimo punto de aforo pueden provocar errores en los aforos instantáneos y en el posterior cálculo del caudal. Es recomendable tener la mayor cantidad posible de datos observados para una correcta calibración (Abbaspour *et al.* 2007).

Varios autores argumentan la necesidad de realizar calibraciones multi-sitio con SUFI-2 para poder estimar las variaciones espaciales dentro de una cuenca (Schuol y Abbaspour 2006; Chien *et al.* 2013). Sin embargo, Shrestha *et al.* (2016), no encontraron mejoras entre calibrar en un solo punto versus una calibración multi-sitio. Abbaspour *et al.* (2007), indican que los errores al calibrar una cuenca, solamente con los datos de salida ocurren por el gran número de subcuencas generadas y usos de suelo que se pueden encontrar dentro de la misma; este no es el caso de la subcuenca analizada que es muy pequeña y poco intervenida.

El primer paso de la calibración es definir cuáles son los parámetros más sensibles. Rostamian *et al.* (2008), explican que la selección de los parámetros para la calibración es una tarea difícil ya que hay múltiples soluciones. En este estudio pasamos de 14 parámetros seleccionados inicialmente mediante una revisión de literatura a 6 parámetros utilizados en la calibración manual del modelo. Ghaffari *et al.* (2010), detallan una lista de los 17 parámetros más sensibles utilizados para calibrar el modelo SWAT en una cuenca en el noroeste de Irán; Singh *et al.* (2013), hacen una descripción de los parámetros más sensibles usados para calibrar una cuenca en el suroeste de India. En ambos estudios se encontraron los 6 parámetros seleccionados en este trabajo. Esto muestra que la preselección de parámetros realizada fue acertada; además se puede ganar tiempo en las simulaciones de SWAT-CUP utilizando menos parámetros iniciales.

En cuencas montañosas la incertidumbre de los datos de entrada puede ser grande (Abbaspour 2015). Un componente que no fue medido en este estudio es la intercepción de niebla o precipitación horizontal; esta humedad es atrapada por la vegetación en la parte alta de la subcuenca donde la nubosidad es abundante durante gran parte del año (Bruijnzeel y Veneklaas 1998; Calvo-Alvarado *et al.* 2010; Frumau *et al.* 2010; Nair *et al.* 2010; Tobón *et al.* 2010; Frumau *et al.* 2011). En algunas zonas, la intercepción de niebla puede ser significativa; Holder (2004) reporta para un bosque nuboso de Guatemala, que la precipitación horizontal puede llegar a contribuir en el balance hídrico con 0,5 mm diario durante la estación lluviosa y hasta 1 mm por día durante la estación seca.

Sin embargo, a pesar de los posibles errores u omisiones en los datos de precipitación y en la estimación de los caudales, se considera que el ajuste posterior a la calibración fue muy bueno, brindando una estimación confiable de la producción de agua en la subcuenca del río Tempisquito.

4.2 Producción de agua y caudales

SWAT es uno de los modelos más ampliamente usados a la hora de simular balance hídrico y erosión (Tuppad *et al.* 2011; Thai *et al.* 2017); sin embargo, también tiene sus limitantes. Algunas limitaciones del modelo se relacionan a la gran cantidad de parámetros de entrada, en ocasiones algunos parámetros se deben estimar con ecuaciones o programas (Saxton y Rawls 2006; Nyeko 2014). Daniel *et al.* (2011), mencionan que SWAT no modela adecuadamente eventos de tormentas individuales y que, como algunos otros modelos, SWAT es sensible al número de curva, presentando limitaciones debido a la no linealidad de la predicción de la escorrentía (Beven 2011). Aun así, es una herramienta que ha probado su potencial de aplicación, incluso en cuencas con faltantes de información.

El único trabajo de modelación hidrológica en la zona de estudio es el realizado por Jiménez *et al.* (2015). Estos autores modelaron el efecto del cambio climático en dos subcuencas de montaña al norte de la provincia de Guanacaste, una de las cuales fue la del río Tempisquito; sin embargo, el punto de aforo usado por ellos se ubicó aguas arriba. El porcentaje de producción de agua estimado en nuestro estudio antes de la calibración (70,4%), es muy similar al encontrado por Jiménez *et al.* (2015), el cual fue del 71,2% de la precipitación; estos autores mencionan que sus modelaciones en HYLUC (Calder 2003) y en NAM (Nielsen y Hansen 1973), subestimaron el caudal en ambas subcuencas. En cambio, nuestra modelación inicial sobreestimó el caudal observado antes de la calibración, consiguiéndose muy buen ajuste después de la misma. Una ventaja de SWAT con respecto a los modelos anteriormente usados en la subcuenca del Tempisquito, es la posibilidad de calibrar los parámetros de entrada del modelo para así, mejorar el ajuste inicial entre caudales observados y estimados.

4.3 Erosión y sedimentos

Los valores de erosión y de sedimentos encontrados en la subcuenca del río Tempisquito son bastante altos, a pesar de que la cobertura de la subcuenca es en su mayoría forestal. Hong Quang *et al.* (2016), en su estudio de modelación de escorrentía superficial y erosión en la provincia Yen Bai, Vietnam, encontraron que aparte del clima y la topografía, el cambio de uso juega un papel importante en la distribución. Esta tendencia contrasta con la encontrada en nuestro estudio, donde no es la cobertura o el uso del suelo, sino la topografía (Oeurng *et al.* 2011), la que está determinando la cantidad de suelo erosionado dentro de la subcuenca, y son las altas pendientes en las laderas del volcán Orosí las que mayor cantidad de sedimentos aportan a los cauces.

Varios son los factores que pueden influir en la estimación de sedimentos dentro de una cuenca, aunque en nuestro estudio no se tienen datos de sedimentos observados y por consiguiente no se pudo realizar una calibración de los mismos, se sabe que factores como el número y tamaño de las subcuencas puede variar los valores de predicción de sedimentos (Bieger

et al. 2014). Arabi *et al.* (2006), determinaron que la producción de sedimentos y de nutrientes es muy sensible al nivel de subdivisión determinado en SWAT.

Otros estudios han demostrado que la resolución del MED tiene un efecto tanto en la delimitación de las subcuencas, como en el cálculo de parámetros topográficos, lo cual modifica la erosión y la producción de sedimentos (Cotter *et al.* 2003; Chaplot 2005, Di Luzio *et al.* 2005). En un estudio en la cuenca del río Ankara, Turquía, Duru *et al.* (2017), determinaron que factores como el caudal, el área de drenaje y el ancho del canal pueden explicar las variaciones en la carga de sedimentos. A diferencia del aparente efecto del MED en la producción de sedimentos, al parecer la resolución de la capa de suelos no produce variaciones en la carga de sedimentos. Mukundan *et al.* (2010), estudiaron el efecto de la resolución espacial de los datos de suelo en una cuenca en Georgia, USA. Los autores modelaron la cuenca con los mapas de suelo de diferente escala y las diferencias de caudales y sedimentos entre modelos fueron estadísticamente insignificantes.

Otro factor que influye en la producción de erosión y de sedimentos en la subcuenca del río Tempisquito, es la cantidad de precipitación ya que en la parte alta de la subcuenca la precipitación anual es mayor en más de un 30% que la precipitación en la parte baja. Duru *et al.* (2017), encontraron una débil correlación entre la precipitación y la carga de sedimentos; estos autores señalan que solamente la precipitación no puede explicar complejos procesos físicos relacionados con la geología y la hidrología del sitio. Sin embargo, en la subcuenca del río Tempisquito se puede observar muy bien como la carga de sedimentos está directamente relacionada con el caudal, y este a su vez, está determinado por las variaciones mensuales de la precipitación.

5. CONCLUSIONES

- Se logró realizar la simulación de la subcuenca del río Tempisquito para el periodo 2008-2013, con un ajuste inicial con respecto a dos puntos de aforo. En el punto Maritza, el ajuste fue insuficiente (NSE -3,45), mientras que a la salida de la subcuenca (Tempisquito-Orosí), fue suficiente (NSE 0,33).
- Después de la calibración con el algoritmo SUFI-2 de SWAT-CUP, se logró un ajuste suficiente en la microcuenca Maritza (NSE 0,22) y uno muy bueno en Tempisquito-Orosí (NSE 0,70). A partir de los valores de p-factor y r-factor se decidió utilizar solamente los parámetros de esta última subcuenca para calibrar el modelo, ya que son los que menor incertidumbre presentaban.
- Una vez calibrado el modelo, se obtuvo una producción de agua de 1512,5 mm que corresponde al 60,1% de la precipitación incidente. La mayor producción de agua se concentra en la parte alta de la subcuenca que es donde llueve más y las pendientes son más pronunciadas.
- La erosión media de la subcuenca del río Tempisquito es de 122,2 t ha⁻¹ año⁻¹, la cual se considera severa. La mayor erosión ocurre en sitios de alta pendiente, mientras que la menor en sitios más planos cerca de la salida de la subcuenca.
- El caudal medio de la subcuenca es de 0,72 m³ s⁻¹, con un máximo en octubre (1,46 m³ s⁻¹) y un caudal mínimo en abril (0,32 m³ s⁻¹). Por su parte, la carga de sedimentos media en la salida de la subcuenca fue de 473,84 t; el valor mínimo de carga ocurre en abril (118,98 t), y el mayor valor se registró en octubre (1333,4 t).

6. RECOMENDACIONES

- Simulaciones como estas se pueden replicar en otras subcuencas aforadas en el área de estudio, con el fin de tener un mejor panorama del aporte de agua y sedimentos que tiene la parte alta de la cuenca del río Tempisque.
- Se recomienda invertir en trampas de sedimentos y estaciones de aforo aguas abajo, para poder tener un valor más acertado de la cantidad de sedimentos transportado, y poder modelar una mayor área.
- También es importante hacer simulaciones en partes más bajas de la cuenca del Tempisque, donde existe un mosaico de usos del suelo, aparte de extracciones de agua, que tienen impacto significativo en los caudales del río.
- En las estaciones de aforo se recomienda realizar muestreos de sedimentos en suspensión cada vez que se realicen aforos instantáneos, para así tener una curva de sedimentos vs. caudal.

- Sería interesante para futuros estudios estimar la precipitación horizontal que ocurre en las partes altas, cercanas a las cumbres de los volcanes, ya que este es un aporte de precipitación no cuantificado.

7. LITERATURA CITADA

- Abbaspour, K. 2015. SWAT-CUP: SWAT calibration and uncertainty programs - A User Manual. s. l. Eawag: Swiss Federal Institute of Aquatic and Technology. 100 p.
- Abbaspour, KC; Johnson, CA; Genuchten, MT. 2004. Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal* 3:1340-1352.
- Abbaspour, KC; Yang, J; Maximov, I; Siber, R; Bogner, K; Mieleitner, J; Zobrist, J; Srinivasan, R. 2007. Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology* 333(2-4):413-430.
- Abbaspour, KC; Rouholahnejad, E; Vaghefi, S; Srinivasan, R; Yang, H y Kløve, B. 2015. A continental-scale hydrology and water quality model for Europe: Calibration and uncertainty of a high-resolution large-scale SWAT model. *Journal of Hydrology* 524:733-752.
- ACG (Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica). 2012. ¿Qué es el ACG? (en línea) Disponible en <http://www.acguanacaste.ac.cr/acg/que-es-el-acg>.
- Ahl, RS; Woods, SW; Zuuring, HR. 2008. Hydrologic calibration and validation of swat in a snow-dominated rocky mountain watershed, Montana, U.S.A. *Journal of the North American Water Resources Association* 44(6):1411-1430.
- Arabi, M; Govindaraju, RS; Hantush, MM; Engel, BA. 2006. Role of watershed subdivision on modeling the effectiveness of best management practices with SWAT. *Journal of the American Water Resources Association* 42(2):513-528.
- Arnold, JG; Fohrer, N. 2005. SWAT2000: current capabilities and research opportunities in applied watershed modelling. *Hydrological Processes* 19(3):563-572.
- Arnold, JG; Moriasi, DN; Gassman, PW; Abbaspour, KC; White, MJ; Srinivasan, R; Santhi, C; Harmel, RD; van Griensven, A; Van Liew, MW; Kannan, N y Jha, MK. 2012. SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE* 55(4):1491-1508.
- ASF. 2016. ALOS PALSAR Global Radar Imagery, 2006-2011 (en línea). Consultado 23 nov. 2016. Disponible en <https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/>
- Behera, S; Panda, RK. 2006. Evaluation of management alternatives for an agricultural watershed in a sub-humid subtropical region using a physical process based model. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 113(1-4):62-72.
- Beven, K. 2011. *Rainfall-Runoff Modelling*. Second edition. Lancaster University, United Kingdom, Wiley-Blackwell. 457 p.
- Bieger, K; Hormann, G; Fohrer, N. 2014. Simulation of streamflow and sediment with the soil and water assessment tool in a data scarce catchment in the three gorges region, china. *J Environ Qual* 43(1):37-45.
- Bruijnzeel, LA; Veneklaas, EJ. 1998. Climatic Conditions and Tropical Montane Forest Productivity: The Fog has no Lifted yet. *Ecology* 79(1):3-9.

- Calder, IR. 2003. Assessing the water use of short vegetation and forests: Development of the Hydrological Land Use Change (HYLUC) model. *Water Resources Research* 39(11):1-8.
- Calvo-Alvarado, J; McLennan, B; Sánchez-Azofeifa, A; Garvin, T. 2009. Deforestation and forest restoration in Guanacaste, Costa Rica: Putting conservation policies in context. *Forest Ecology and Management* 258(6):931-940.
- Calvo-Alvarado, JC; Sanchez-Azofeifa, GA; Méndez, A. 2010. Conservation Strategies of Montane Cloud Forest in Costa Rica: The Case of Protected Areas, Payments for Environmental Services and Ecotourism. *In* Bruijnzeel, LA; Scatena, FN; Hamilton, LS (eds.). *Tropical Montane Cloud Forests: Science for Conservation and Management*. Cambridge, United Kingdom, Cambridge University Press. p. 686-690.
- Chaplot, V. 2005. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO₃-N loads predictions. *Journal of Hydrology* 312(1-4):207-222.
- Chaubey, I; Cotter, AS; Costello, TA; Soerens, TS. 2005. Effect of DEM data resolution on SWAT output uncertainty. *Hydrological Processes* 19:621-628.
- da Silva, VPR; Silva, MT; de Souza, EP. 2016. Influence of Land Use Change on Sediment Yield: A Case Study of the Sub-middle of the São Francisco River Basin. *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering* 36(6):1005-1015.
- Chien, H; Yeh, PJ-F; Knouft, JH. 2013. Modeling the potential impacts of climate change on streamflow in agricultural watersheds of the Midwestern United States. *Journal of Hydrology* 491:73-88.
- Cotter, AS; Chaubey, I; Costello, TA; Soerens, TS; Nelson, MA. 2003. Water quality model output uncertainty as affected by spatial resolution of input data. *Journal of Water Resources Association* 39(4):977-986.
- Daniel, EB; Camp, JV; LeBoeuf, EJ; Penrod, JR; Dobbins, JP; Abkowitz, MD. 2011. Watershed Modeling and its Applications: A State-of-the-Art Review. *The Open Hydrology Journal* 5:26-50.
- Dile, YT; Daggupati, P; George, C; Srinivasan, R; Arnold, J. 2016. Introducing a new open source GIS user interface for the SWAT model. *Environmental Modelling & Software* 85:129-138.
- Di Luzio, M; Arnold, JG; Srinivasan, R. 2005. Effect of GIS data quality on small watershed stream flow and sediment simulations. *Hydrological Processes* 19(3):629-650.
- Douglas-Mankin, KR; Srinivasan, R; Arnold, JG. 2010. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Model: Current Developments and Applications. *Transactions of the ASABE* 53(5):1423-1431.
- Duru, U; Wohl, E; Ahmadi, M. 2017. Factors Controlling Sediment Load in The Central Anatolia Region of Turkey: Ankara River Basin. *Environ Manage* 59(5):826-841.
- Fallas, J. 2014. Ríos 1:50000. *In* Ortíz, E (ed.). *Atlas Digital 2014*. Cartago, Costa Rica, ITCR.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación) – PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente – UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). 1980. Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos. París, Francia. Disponible en <https://books.google.co.cr/books?id=9stIPAAACAAJ>
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2009. Guía para la descripción de suelos (en línea). Trads. Vargas Rojas, R; Arias Jiménez, A; Straaten, PV; Lavelle, P; Zonn,

- S; Ibish, P; Buol, S; Graham, R; Mcdaniel, P Rc; Vessel, A. Cuarta ed. Roma, Italia. 99 p. Consultado 7 nov. 2017. Disponible en <http://www.fao.org/3/a-a0541s.pdf>
- Fohrer, N; Haverkamp, S; Eckhardt, K; Frede, HG. 2001. Hydrologic response to land use changes on the Catchment scale. *Phys. Chem. Earth* 26(7-8):577-582.
- Foglia, L; Hill, MC; Mehl, SW; Burlando, P. 2009. Sensitivity analysis, calibration, and testing of a distributed hydrological model using error-based weighting and one objective function. *Water Resources Research* 45(6):1-18.
- Frumau, A; Burkard, R; Schmid, S; Bruijnzeel, LA; Tobón, C; Calvo-Alvarado, JC. 2010. Fog gauge performance under conditions of fog and wind-driven rain. *In* Bruijnzeel, LA; Scatena, FN; Hamilton, LS (eds.). *Tropical Montane Cloud Forests: Science for Conservation and Management*. Cambridge, United Kingdom, Cambridge University Press. p. 293-301.
- Frumau, KFA; Burkard, R; Schmid, S; Bruijnzeel, LAS; Tobón, C; Calvo-Alvarado, JC. 2011. A comparison of the performance of three types of passive fog gauges under conditions of wind-driven fog and precipitation. *Hydrological Processes* 25(3):374-383.
- Gassman, PW; Reyes, M; Green, CH; Arnold, JG. 2007. The Soil and Water Assessment Tool: Historical development, applications, and future directions. *Transactions of the ASABE* 50(4):1211-1250.
- Ghaffari, G; Keesstra, S; Ghodousi, J; Ahmadi, H. 2010. SWAT-simulated hydrological impact of land-use change in the Zanjanrood basin, Northwest Iran. *Hydrological Processes* 24(7):892-903.
- Gupta, HV; Kling, H; Yilmaz, KK; Martinez, GF. 2009. Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology* 377:80-91.
- Gupta, HV; Sorooshian, S; Yapo, PO. 1999. Status of Automatic Calibration for Hydrologic Models: Comparison with Multilevel Expert Calibration. *Journal of Hydrologic Engineering* 4(2):135-143.
- Gutiérrez, C; Lucke, O; Solórzano, R. 1986. Integración de la Conservación con el Desarrollo en el Proyecto de Riego Arenal-Tempisque. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 55 p.
- Guzmán, I; Calvo-Alvarado, JC. 2012. Water resources of the Upper Tempisque River Watershed, Costa Rica. *Tecnología en Marcha* 25(4):63-70.
- Holder, CD. 2004. Rainfall interception and fog precipitation in a tropical montane cloud forest of Guatemala. *Forest Ecology and Management* 190:373-384.
- Holdridge, LR. 1964. *Life Zone Ecology*. San José, Costa Rica, Centro Científico Tropical. 206 p.
- Hong Quang, N; Thu Hang, LT; Thanh Nga, PT y Kappas, M. 2016. Modelling surface runoff and soil erosion for Yen Bai Province, Vietnam, using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). *Journal of Vietnamese Environment* 8(1):71-79.
- Jiménez-Rodríguez, CD; Calvo-Alvarado, JC; Jackson, JK. 2015. Performance of Two Hydrological Models in Predicting Daily Flow under a Climate Change Scenario for Mountainous Catchments in Northwestern Costa Rica. *Mountain Research and Development* 35(3):240-253.

- Kalacska, M; Sanchez-Azofeifa, GA; Calvo-Alvarado, JC; Quesada, M; Rivard, B; Janzen, DH. 2004. Species composition, similarity and diversity in three successional stages of a seasonally dry tropical forest. *Forest Ecology and Management* 2001-3:227-247.
- Mateo-Vega, J. 2001. Características Generales de la Cuenca del Río Tempisque. *In* Jiménez, JA; González, E. La cuenca del Río Tempisque: perspectivas para un manejo integrado San José, Costa Rica, Organización para Estudios Tropicales. 150 p.
- Morales, MC. 2014. Estimación de la erosión laminar y sedimentación con modelos hidrológicos para la selección de prácticas de conservación de suelos y cambios de cobertura en la Unidad Hidrográfica de Aquin/Saint-Louis Du Sud- Haití. Thesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, CATIE. 82 p.
- Moriasi, DN; Arnold, JG; Van Liew, MW; Bingner, RL; Harmel, RD; Veith, TL. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50(3):885-900.
- Mukundan, R; Radcliffe, DE; Risse, LM. 2010. Spatial resolution of soil data and channel erosion effects on SWAT model predictions of flows and sediment. *Journal of Soil and Water Conservation* 65(2):92-104.
- Nair, U; Ray, D; Lawton, R; Welch, R; Pielke, P; Calvo-Alvarado, J. 2010. The impact of deforestation on orographic cloud formation in a complex tropical environment. *In* Bruijnzeel, LA; Scatena, FN; Hamilton, LS (eds.). *Tropical Montane Cloud Forests: Science for Conservation and Management*. Cambridge, United Kingdom, Cambridge University Press. p. 238-248.
- Nash, JE ; Sutcliffe, JV. 1970. River flow forecasting through conceptual models: part I - a discussion principles. *Journal of Hydrology* 10:282-290.
- Neitsch, SL; Williams, JR; Arnold, JG; Kiniry, JR. 2011. Soil and water assessment tool theoretical documentation version 2009. Texas, United States of America, Texas Water Resources Institute. 618 p.
- Newbold, JD; Sweeney, BW; Jackson, JK; Kaplan, LA. 1995. Concentrations and export of solutes from six mountain streams in northwestern Costa Rica. *Journal of the North American Benthological Society* 14(1):21-37.
- Nielsen, SA; Hansen, E. 1973. Numerical simulation of the rainfall-runoff process on a daily basis. *Nordic Hydrology* 4:171-190
- Nyeko, M. 2014. Hydrologic Modelling of Data Scarce Basin with SWAT Model: Capabilities and Limitations. *Water Resources Management* 29:81-94.
- Oeurng, C; Sauvage, S; Sánchez-Pérez, J-M. 2011. Assessment of hydrology, sediment and particulate organic carbon yield in a large agricultural catchment using the SWAT model. *Journal of Hydrology* 401(3-4):145-153.
- Rostamian, R; Jaleh, A; Afyuni, M; Mousavi, SF; Heidarpour, M; Jalalian, A; Abbaspour, KC. 2008. Application of a SWAT model for estimating runoff and sediment in two mountainous basins in central Iran. *Hydrological Sciences Journal* 53(5):977-988.
- Rouholahnejad, E; Abbaspour, KC; Vejdani, M; Srinivasan, R; Schulin, R; Lehmann, A. 2012. A parallelization framework for calibration of hydrological models. *Environmental Modelling & Software* 31:28-36.

- Saxton, KE; Rawls, WJ. 2006. Soil Water Characteristic Estimates by Texture and Organic Matter for Hydrologic Solutions. *Soil Science Society of America Journal* 70:1569-1578
- Schuol, J; Abbaspour, KC. 2006. Calibration and uncertainty issues of a hydrological model (SWAT) applied to West Africa. *Advances in Geosciences, European Geosciences Union*, 9:137-143.
- Shrestha, MK; Recknagel, F; Frizenschaf, J; Meyer, W. 2016. Assessing SWAT models based on single and multi-site calibration for the simulation of flow and nutrient loads in the semi-arid Onkaparinga catchment in South Australia. *Agricultural Water Management* 175:61-71.
- Singh, V; Bankar, N; Salunkhe, SS; Bera, AK; Sharma, JR. 2013. Hydrological stream flow modelling on Tungabhadra catchment: parameterization and uncertainty analysis using SWAT CUP. *Current Science* 104(9):1187-1199.
- SIREFOR (Sistema de Información de Recursos Forestales, Costa Rica). 2014. Tipos de bosque Costa Rica. *In* Ortíz, E (ed.). *Atlas Digital 2014*. Cartago, Costa Rica, ITCR.
- Soil Survey Staff. 1993. *Soil Survey Manual*. USDA, Soil Conservation Service. Washington, D.C., United States of America, U.S. Gov. Print. Office. (Agricultural Handbook No. 18).
- Spruill, CA; Workman, SR; Taraba, JL. 2000. Simulation of Daily and Monthly Stream Discharge from Small Watersheds Using the SWAT Model. *Transactions of the ASAE. American Society of Agricultural Engineers* 43(6):1431-1439.
- SWRC (Stroud Water Research Center). 2016. Long-Term Research in Environmental Biology: Costa Rica (en línea). Consultado 9 feb. 2017. Disponible en <http://www.stroudcenter.org/research/projects/ltreb/costarica/>
- Thai, TH; Thao, NP; Dieu, BT. 2017. Assessment and Simulation of Impacts of Climate Change on Erosion and Water Flow by Using the Soil and Water Assessment Tool and GIS: Case Study in Upper Cau River basin in Vietnam. *Vietnam Journal of Earth Sciences* 39(4):376-392.
- Tobón, C; Bruijnzeel, LA; Frumau, KFA; Calvo-Alvarado, JC. 2010. Changes in soil physical properties after conversion of tropical montane cloud forest to pasture in northern Costa Rica. Bruijnzeel, LA; Scatena, FN; Hamilton, LS (eds.). *Tropical Montane Cloud Forests: Science for Conservation and Management*. Cambridge, United Kingdom, Cambridge University Press.
- Tuppad, P; Douglas-Mankin, KR; Lee, T; Srinivasan, R; Arnold, JG. 2011. Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Hydrologic/Water Quality Model: Extended Capability and Wider Adoption. *Transactions of the ASABE* 54(5):1677-1684
- Ullrich, A; Volk, M. 2009. Application of the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to predict the impact of alternative management practices on water quality and quantity. *Agricultural Water Management* 96:1207-1217.
- Williams, JR; Berndt, HD. 1977. Sediment Yield Prediction Based on Watershed Hydrology. *Transactions of the ASAE*:1100-1104.
- Winchell, M; Srinivasan, R; Di Luzio, MJ. 2013. *ArcSWAT interface for SWAT2012*. Texas, United States of America, Editor.

CAPÍTULO III

ARTÍCULO II. Producción de agua y sedimentos bajo diferentes escenarios de zonas de vida y cambio climático en la subcuenca del río Tempisquito

RESUMEN

El cambio climático y de cobertura pueden influir significativamente en el ciclo hidrológico y, por lo tanto, afectar el recurso hídrico. El objetivo de este trabajo fue utilizar escenarios de cambio climático futuro para evaluar los cambios geográficos de las zonas de vida presentes en la subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica, y mediante el uso del modelo SWAT, estimar su efecto en la producción de flujos de agua y sedimentos. Para ello se aplicó la interfase de QGIS de la herramienta de evaluación de suelos y aguas (QSWAT). Se utilizaron las anomalías de precipitación y temperatura de dos escenarios de concentración de gases de efecto invernadero, RCP 4.5 y RCP 8.5, según cinco modelos de circulación general al año 2070. Para todos los escenarios simulados se proyectaron aumentos de temperatura en el futuro. La misma tendencia es observada para la precipitación, a excepción de dos modelos (ccsm4 y cesm1_cam5_1_fv2), que proyectan una disminución en la precipitación. Se espera una disminución en el número de zonas de vida en todos los escenarios, un aumento en el área de las zonas de vida bosque seco tropical y bosque húmedo tropical, así como una disminución en el área de las zonas de vida del piso premontano. La producción de agua variará en el escenario RCP 4.5 entre -12,63% y 26,16%; en el RCP 8.5 la variación será entre -37,07% y 69,75% con respecto al periodo 2008-2013; además se espera que en el 80% de los modelos según un RCP 4.5 y en el 75% de los modelos según el RCP 8.5, se dé un aumento en la producción de agua. Finalmente, se espera que la erosión varíe entre -13,8% y 70,1% para el escenario RCP 4.5 y entre -47,2% y 228,5%, según el escenario RCP 8.5, con respecto al periodo 2008-2013 y que la erosión aumente en el 80% de los modelos del RCP 4.5 y en el 75% de los del RCP 8.5. Factores como la cantidad y distribución de la precipitación modifican la erosión en los escenarios futuros.

Palabras clave: Modelo SWAT, zonas de vida de Holdridge, producción de agua, erosión, producción de sedimentos.

ABSTRACT

Climate change and land use change can significantly influence the hydrological cycle and, therefore, affect water resources. The objective of this work is to use different future climate change scenarios to generate the geographical changes of the different life zones and by using the SWAT model and estimate the impact on the of water yield and sediment flows of the Tempisquito watershed, Guanacaste, Costa Rica. The QGIS interface of the soil and water evaluation tool (QSWAT) was used. The precipitation and temperature anomalies of 2 RCP 4.5 and RCP 8.5 concentration of greenhouse gases scenarios were calculated according to 5 general circulation models to the year 2070, in all scenarios and model higher temperatures are projected

in the future, but only 2 models (ccsm4 and cesm1_cam5_1_fv2) project a decrease in precipitation. A decrease in the number of life zones is expected in all scenarios, and an increase is expected in the extend of the Tropical dry forest and Tropical humid forest life zones, as well as a decrease in the extend of life zones of the Premontane floor. Water yield will vary in the RCP 4.5 scenario between -12.63% and 26.16% and in RCP 8.5 the variation will be between -37.07% and 69.75% with respect to the 2008-2013 period, in addition to the it expects that in 80% of the models according to a RCP 4.5 and in 75% of the models according to the RCP 8.5 there will be an increase in the production of water. Finally, erosion is expected to vary between -13.8% and 70.1% for the RCP 4.5 scenario and between -47.2% and 228.5%, according to the RCP 8.5 scenario. With respect to the 2008-2013 period erosion is expected to increase in 80% of the RCP 4.5 models and in 75% of the RCP 8.5 models, factors such as the amount and distribution of precipitation modify erosion in future scenarios.

Key words: SWAT model, Holdridge life zones, water yield, erosion, sediment yield.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático representa una seria amenaza para la biodiversidad, sobre todo en la distribución de especies (Araújo y Rahbek 2006). En América Central, las sequías y las inundaciones son consecuencia de la alta variabilidad espacial y temporal del clima (Hidalgo *et al.* 2013). Dicha variabilidad climática es el resultado de varios fenómenos naturales a diferentes escalas espaciales y temporales (Amador *et al.* 2006).

Los efectos potenciales sobre los recursos hídricos causados por el cambio climático global en las últimas décadas fueron motivo de considerable preocupación (Githui *et al.* 2009). Los cambios climáticos y de uso de la tierra pueden influir significativamente en el ciclo hidrológico y, por lo tanto, afectar los recursos hídricos (Wang *et al.* 2008). El cambio climático regional tiene una influencia significativa en las características hidrológicas de una cuenca, lo que puede alterar sustancialmente el volumen y tiempo de escorrentía (Ma *et al.* 2009).

Los cambios futuros en el clima alterarán las condiciones hidrológicas regionales y, posteriormente, afectarán los recursos hídricos regionales en términos de cantidad y calidad (Gleick 1989, Jyrkama y Sykes 2007). Definir escenarios de cambio climático es una herramienta ampliamente utilizada para proyectar estos cambios. Dentro de estos escenarios el modelado hidrológico es importante para estudiar los cambios potenciales en la hidrología de las cuencas y para proyectar los posibles impactos en los recursos hídricos (Singh y Woolhiser 2002; Praskievicz y Chang 2009; Portillo *et al.* 2015). El modelo SWAT puede simular la cantidad y calidad del agua y evaluar los efectos del cambio en el uso de la tierra y las actividades antropogénicas para la gestión sostenible de los recursos hídricos (Shi *et al.* 2011).

Los estudios donde se ha utilizado el modelado con SWAT para evaluar los impactos futuros del cambio climático son muchos. Narsimlu *et al.* (2013), evaluaron los impactos del cambio climático en los recursos hídricos de la cuenca del río Upper Sind, India, utilizando el modelo SWAT. Ficklin *et al.* (2009), evaluaron la sensibilidad al cambio climático de una cuenca altamente agrícola. Zhang *et al.* (2007) predijeron la respuesta hidrológica al cambio climático en la cuenca del río Louhe, en China.

En Centroamérica, los efectos de esta variabilidad climática pueden ser observados sobre la distribución de las zonas de vida de Holdridge (1964). Diversos estudios se han llevado a cabo sobre los efectos del cambio climático en las zonas de vida en algunos países de Centroamérica. Mendoza *et al.* (2001), estudiaron la sensibilidad de las zonas de vida de Holdridge en Nicaragua en función del cambio climático. Alpizar (2007), evaluó la vulnerabilidad de los bosques de Costa Rica ante el cambio climático. Jiménez *et al.* (2010), estudiaron los efectos del cambio climático en la distribución de las zonas de vida en Centroamérica y sus resultados concuerdan con las tendencias globales esperadas. Khatun *et al.* (2013), evaluaron los impactos del cambio climático en los bosques tropicales de América Central utilizando el sistema de clasificación de tierras de zonas de vida Holdridge.

Debido a que las condiciones hídricas varían de región a región, la influencia del cambio climático en los procesos hidrológicos locales difiere entre localidades aun cuando presenten condiciones climáticas similares, como es el caso de las zonas de vida que conforman una determinada cuenca. El objetivo de este trabajo es utilizar diferentes escenarios de cambio climático futuro para generar los cambios geográficos de las diferentes zonas de vida mediante el uso del modelo SWAT y estimar su efecto en la producción de flujos de agua y sedimentos en la subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica.

2. MÉTODOS Y MATERIALES

2.1 Modelos de circulación general

Se utilizaron capas de precipitación y temperatura de cinco modelos de circulación general (MCG) y dos RCP's, 4.5 y 8.5, para la climatología centrada en el año 2070 (www.worldclim.org). Estas capas tienen una resolución espacial de 1 km²; además, tienen reducción de escala estadística, corrección de sesgo y corresponden al promedio mensual de los años 2061-2080 (Hijmans *et al.* 2005). Los MCG se basan en la representación matemática de las leyes físicas que gobiernan el clima terrestre (Hidalgo y Alfaro 2015).

La selección de estos modelos se hizo según el *ranking* generado por Hidalgo y Alfaro (2015), en 48 MCG (CMIP5), según la reproducción de características básicas del clima a finales del siglo XX en Centroamérica. En *ranking* se realizó con base en parámetros como representación de la precipitación, la temperatura en la superficie o el fenómeno de El Niño (ENSO). En el Cuadro 10 se presentan los cinco modelos utilizados en este estudio, cuyos datos están disponibles en WorldClim.

Cuadro 10. Modelos de circulación general utilizados para predecir el clima futuro y su ranking para reproducir las condiciones climáticas de América Central

Modelo	Centro de modelado	Ranking
cnrm_cm5	Centre National de Recherches Meteorologiques	3
cesm1_cam5_1_fv2	Centro Euro-Mediterraneo per I Cambiamenti Climatici	5
ccsm4	Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis	13
mpi_esm_lr	Max Planck Institute for Meteorology	15
mri_cgcm3	Meteorological Research Institute	16

Fuente: Hidalgo y Alfaro (2015)

2.2 Anomalías de precipitación y temperatura

Las anomalías mensuales de temperatura y precipitación son un insumo necesario del modelo SWAT para proyectar variaciones del balance hídrico a futuro. Se estimaron las anomalías mensuales de precipitación y temperatura para los cinco MCG y dos RCP: 4.5 y 8.5, utilizando las capas mensuales de precipitación y temperatura correspondientes al año 2070. Para el periodo actual, se utilizaron las capas del periodo 1970-2000 también disponibles en WorldClim (Fick y Hijmans 2017). Todas las capas tienen una resolución espacial de 1 km². Las anomalías se estimaron de la siguiente manera:

$$Anomalía_{prec} \frac{Prec_{fut} - Prec_{act}}{Prec_{act}} = *100$$

Donde:

$Anomalía_{prec}$ = Anomalía de precipitación mensual (%)

$prec_{fut}$ = Precipitación mensual futura (mm)

$prec_{act}$ = Precipitación mensual actual (mm)

$$Anomalia_{temp} = Temp_{fut} - Temp_{act}$$

Donde:

$Anomalia_{temp}$ = Anomalía de temperatura mensual (°C)

$Temp_{fut}$ = Temperatura mensual futura (°C)

$Temp_{act}$ = Temperatura mensual actual (°C)

2.3 Sistema de zonas de vida de Holdridge

Para modelar los cambios futuros de tipos de vegetación se utilizó el sistema de zonas de vida de Holdridge. Este es un sistema basado en pocas variables climáticas, de fácil obtención y que ha sido utilizado en muchas partes del mundo para simular cambios futuros en los tipos de vegetación (Yates *et al.* 2000; Chen *et al.* 2003; Jiménez *et al.* 2010).

2.3.1 Determinación de la biotemperatura y precipitación anual

El sistema de zonas de vida de Holdridge utiliza datos de biotemperatura y precipitación anual para determinar una zona de vida. Las capas de biotemperatura se crearon a partir de capas mensuales de temperatura máxima y mínima, las cuales se reclasificaron de la siguiente manera:

temperaturas menores a 0°C se reclasificaron como 0°C y las mayores a 30°C como 30°C. Una vez reclasificadas las capas, se procedió a obtener la capa de la biotemperatura anual de la subcuenca mediante el promedio de las biotemperaturas mensuales. La precipitación media anual se obtuvo sumando las capas de las precipitaciones mensuales (Jiménez *et al.* 2010).

2.3.2 Reducción de escala y delimitación de las zonas de vida

Como se mencionó anteriormente, el tamaño de pixel de las capas utilizadas para determinar las zonas de vida de Holdridge es de alrededor de 1 km². Tomando en cuenta el área de la subcuenca del río Tempisquito (14,29 km²), se procedió a reducir la resolución espacial de las capas de biotemperatura y precipitación para tener así una delimitación de zonas de vida menos brusca.

En el caso de la precipitación anual se procedió a obtener el dato de precipitación para cada pixel mediante la creación de una capa de centroides (un punto en el centro de cada pixel con el valor del mismo). Con esta información se realizó una interpolación espacial, mediante la utilización del método geoestadístico de Kriging, el cual funciona bastante bien para interpolar valores anuales de precipitación (Ashiq *et al.* 2010; Ly *et al.* 2013). La escala final de reducción de las capas de precipitación anual es de 12,5 metros. La Figura 15 muestra el proceso de reducción de escala y su resultado.

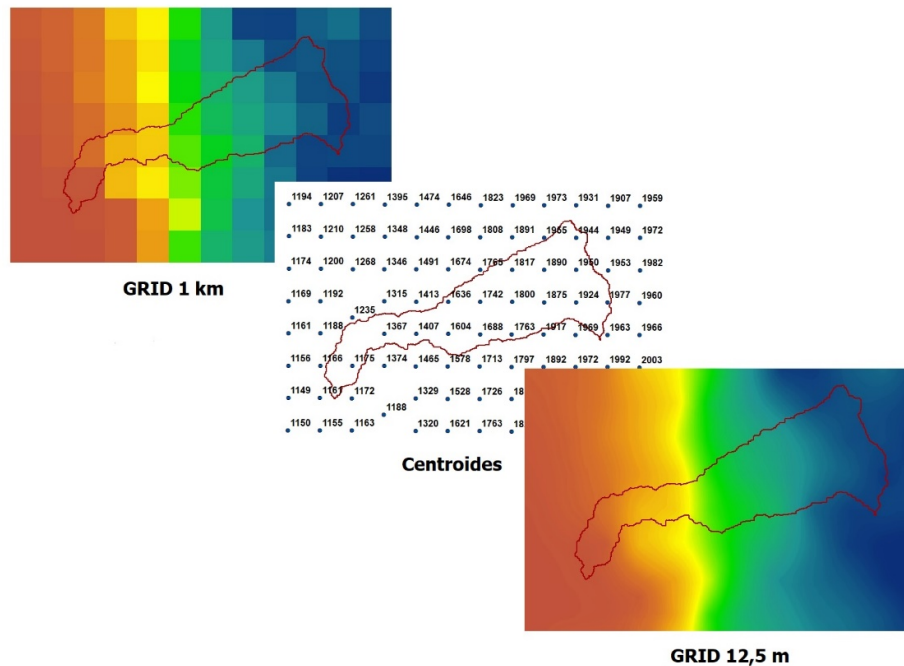


Figura 15. Reducción de escala de las capas de precipitación mediante la formación de centroides con información de cada pixel y su posterior interpolación espacial por el método de Kriging, subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica.

La reducción de escala de las capas de biotemperatura no se realizó con interpolación espacial, si no que se obtuvieron los centroides de cada pixel con su respectiva información de temperatura. Posteriormente, a cada centroide se le agregó la información de elevación que se extrajo del MED de la cuenca. Con la información de biotemperatura y elevación se procedió a realizar un modelo de regresión para cada capa de temperatura; con la ecuación resultante y un MED de 12,5 m se obtuvo una capa de biotemperatura con su respectiva reducción de escala. Este método es más apropiado que una interpolación espacial que no cuente con la covariable de elevación, ya que la regresión toma en cuenta esta variable y el gradiente que existe entre una temperatura y su respectiva elevación (Brown y Comrie 2002; Vicente-Serrano *et al.* 2003).

Una vez realizada la reducción de escala en las capas de biotemperatura y precipitación, se procedió a reclasificar las capas de la siguiente manera: la biotemperatura anual se reclasificó según los rangos: $T_{\text{bio}} > 24^{\circ}\text{C} = 1$, $24^{\circ}\text{C} > T_{\text{bio}} > 18^{\circ}\text{C} = 2$, $18^{\circ}\text{C} > T_{\text{bio}} > 12^{\circ}\text{C} = 3$. La precipitación se reclasificó así: $1000 \text{ mm} < P < 2000 \text{ mm} = 10$, $2000 \text{ mm} < P < 4000 \text{ mm} = 20$. La capa de pisos altitudinales se generó reclasificando la capa de biotemperatura promedio anual de la siguiente manera: $T_{\text{bio}} > 24^{\circ}\text{C} = 100$ (basal), $24^{\circ}\text{C} > T_{\text{bio}} > 18^{\circ}\text{C} = 200$ (premontano) y $18^{\circ}\text{C} > T_{\text{bio}} > 12^{\circ}\text{C} = 300$ (montano bajo). No fue necesario crear una capa de regiones latitudinales ya que todo el territorio de Costa Rica se encuentra en la región latitudinal tropical (Holdridge 1964; Tosi 1964; Jiménez *et al.* 2010).

Finalmente, con las capas de biotemperatura, precipitación anual y piso altitudinal para los escenarios futuros, se procedió a calcular las zonas de vida. Para ello se sumaron las tres capas. El resultado corresponde a cada una de las zonas vida y piso altitudinal según la combinación de factores climáticos. Cada zona de vida se asoció a una cobertura según la nomenclatura de SWAT; el producto final fue una capa de vegetación futura para cada MCG y RCP.

2.4 Incorporación de insumos al modelo calibrado de SWAT

Las zonas de vida futuras ingresaron al modelo como capas de vegetación. Cada una se utilizó para calcular los HRU del modelo; las anomalías de precipitación y temperatura mensual también se adicionaron. La simulación de salida corresponde a un escenario futuro de la subcuenca del río Tempisquito para un determinado MCG y RCP (Figura 16). Cabe recalcar que, aunque los datos de clima futuro utilizados para estimar las anomalías de precipitación y temperatura, como para el modelado de zonas de vida corresponden a un periodo de 30 años, únicamente se contaron con 5 años de datos para correr y calibrar el modelo hidrológico.

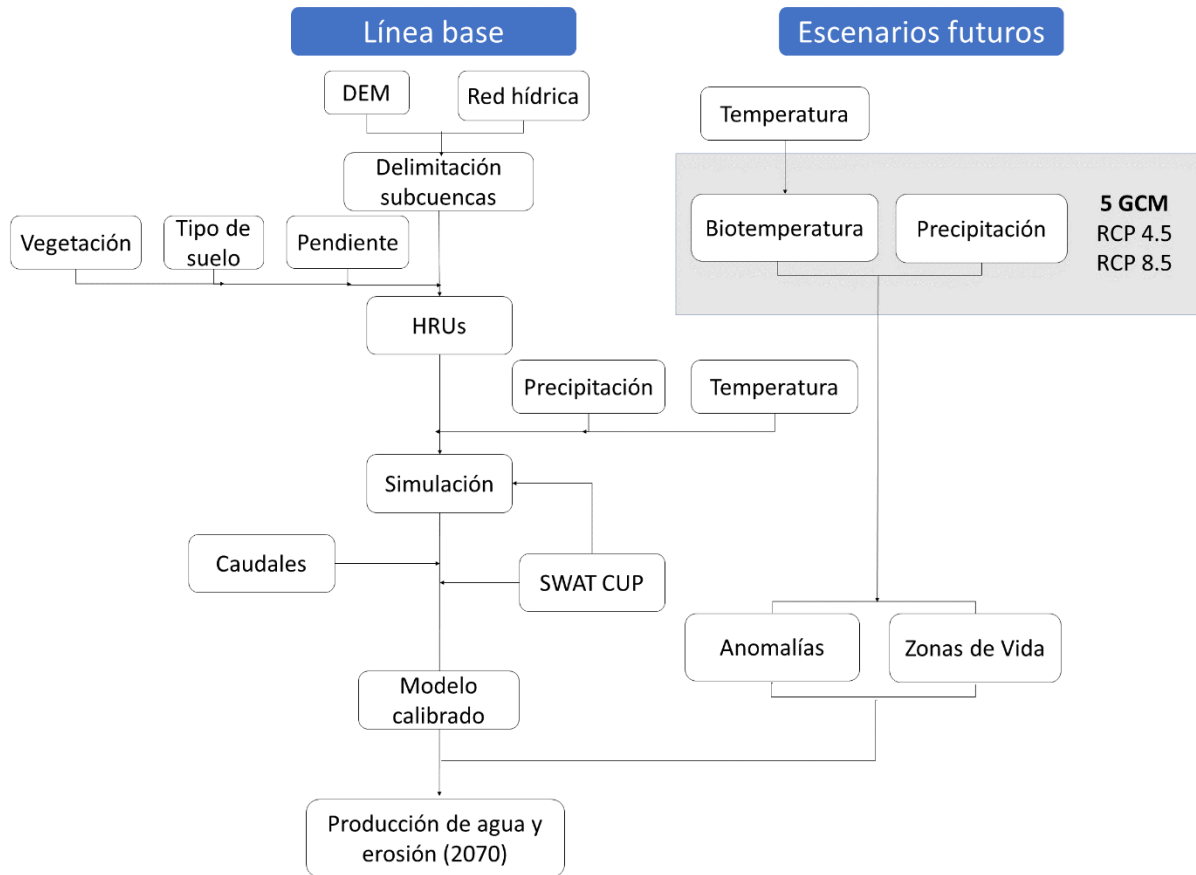


Figura 16. Flujograma que representa la modelación en SWAT calibrada según escenarios futuros de producción de agua y erosión para la subcuenca del río Tempisque, Guanacaste, Costa Rica

3. RESULTADOS

3.1 Anomalías de temperatura y precipitación al año 2070

Para el área de estudio se calcularon las anomalías de temperatura y precipitación al año 2070, según cinco MCG y dos escenarios de emisiones RCP 4.5 y RCP 8.5 (Figura 17). En ambos escenarios se prevé que la temperatura aumente: en el escenario RCP 4.5 el aumento de temperatura está entre 1,24°C (cnrm_cm5) a 2,27°C (cesm1_cam5_1_fv2), mientras que en el RCP 8.5 está entre 2,07°C (cnrm_cm5) y 2,92°C (mpi_esm_lr). La tendencia de las anomalías de precipitación depende del modelo utilizado: en el escenario RCP 4.5 la variación oscila entre -12,89% (ccsm4) a 12,88% (mpi_esm_lr), mientras que en el escenario RCP 8.5 las anomalías son más drásticas y están entre -27,80% (ccsm4) y 36,13% (mri_cgcm3).

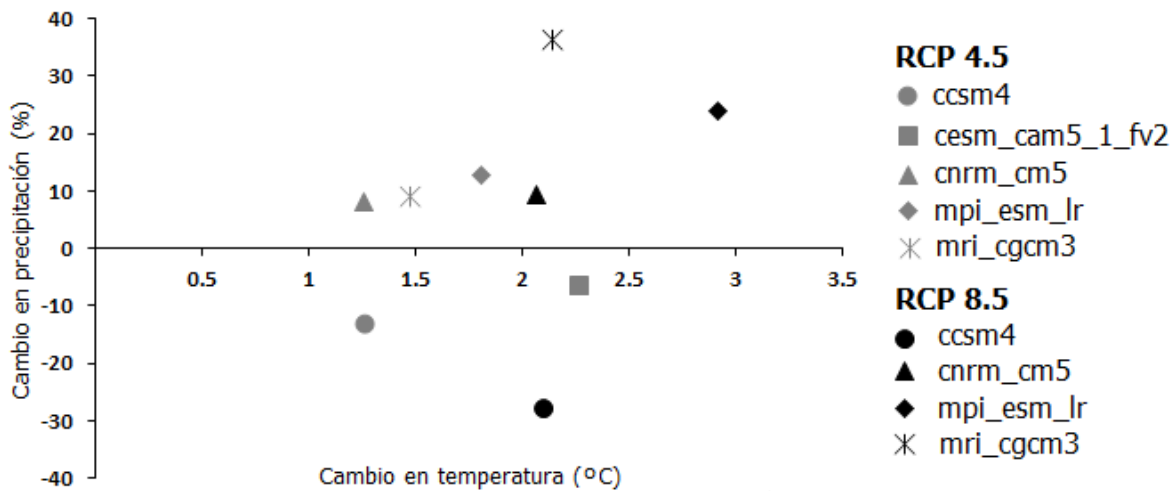


Figura 17. Anomalías de temperatura y precipitación de cinco modelos de circulación general bajo dos escenarios de emisiones en el área de estudio de la subcuenca del río Tempisque, Guanacaste, Costa Rica

3.2 Zonas de vida de Holdridge al año 2070

La línea base de zonas de vida utilizada en este estudio corresponde al periodo 1970-2000. Según los datos de biotemperatura y precipitación promedio anual, para este periodo en la subcuenca del río Tempisque hay cuatro zonas de vida: bosque seco tropical (Bs-T) con 0,13% del área total de subcuenca, bosque húmedo premontano (Bh-P) con 3,25%, bosque húmedo tropical (Bh-T) con 24,31% y el bosque muy húmedo premontano (Bmh-P) con un 72,30%.

Al año 2070, se da una disminución en el número de zonas de vida en todos los escenarios y modelos (Figura 18). En el escenario RCP 4.5, todos los modelos pasan de cuatro zonas de vida a solamente tres; la zona de vida que desaparece es el Bh-P. En el escenario RCP 8.5, el 75% de los modelos presentan solamente dos zonas de vida; el Bh-P solamente se encuentra presente

en el modelo ccsm4 y el Bs-T desaparece de los modelos mpi_esm_lr y mri_cgcm3. El aumento de la precipitación en estos dos modelos es la causa de la desaparición de esta zona de vida. Esta tendencia contrasta con el modelo ccsm4 en el que se proyecta que para un RCP 8.5, la zona de vida Bs-T abarque un 60,81% de la subcuenca. El Bs-T también gana extensión en todos los modelos del escenario RCP 4.5; el área de esta zona de vida va de un 7,48% (mpi_esm_lr) a 30,87% (ccsm4), del área total de la subcuenca. Cabe recordar que el área de Bs-T para el periodo 1970-2000 no llega al 1%.

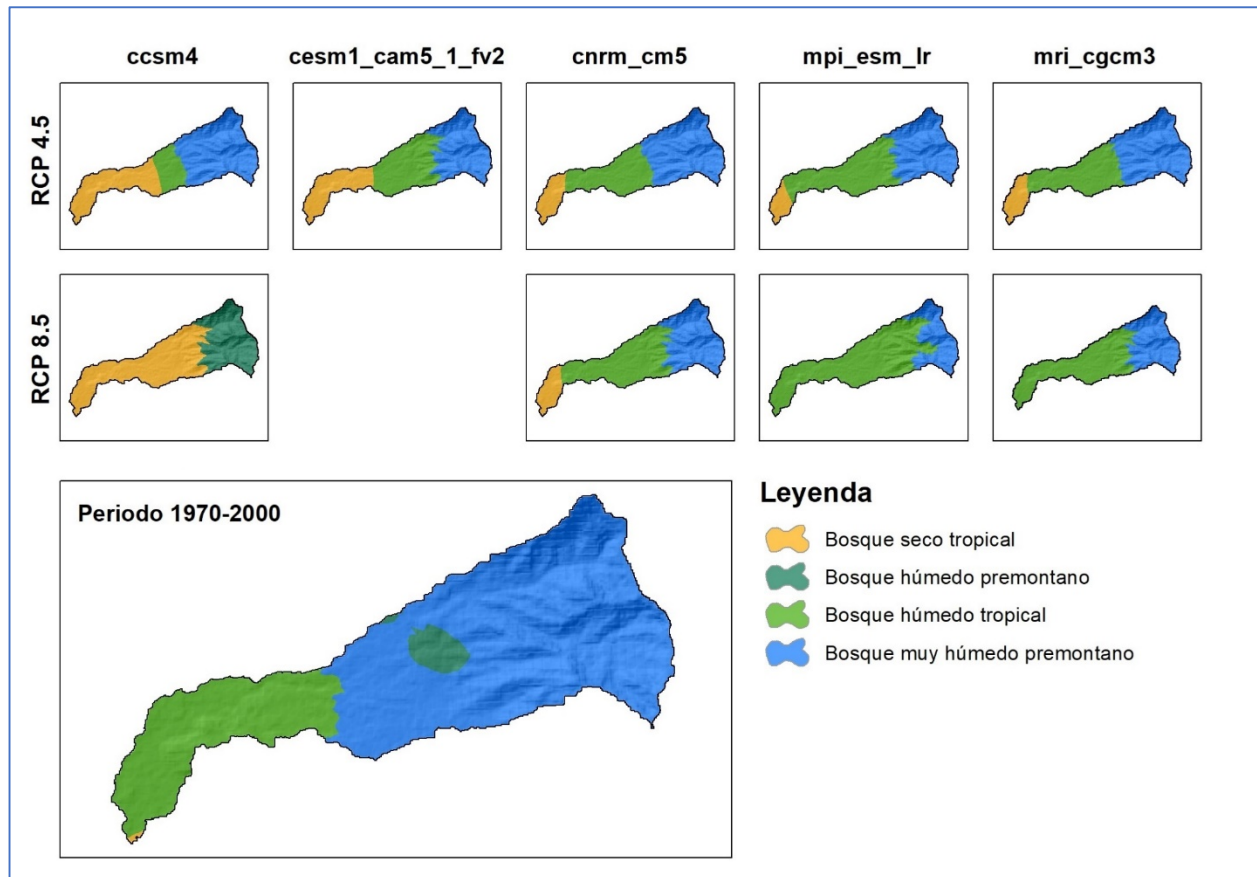


Figura 18. Zonas de vida de Holdridge al año 2070 para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 según cinco modelos de circulación general en la subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica

La zona de vida Bh-T también gana área en ambos escenarios de emisiones; en el RCP 4.5, el 80% de los MCG presentan un aumento en el área; en el modelo mpi_esm_lr, el área del Bh-T casi se duplica (46,98%), mientras que en el escenario RCP 8.5, en el 75% de los modelos el área del Bh-T también aumenta. El modelo donde el Bh-T alcanza mayor área alcanza es el mpi_esm_lr que triplica el área del periodo actual (74,47%). Por otra parte, para el periodo 1970-2000 la zona de vida con mayor área es el Bmh-P (72,30%); esta zona de vida disminuye su área en ambos escenarios de emisiones y en todos los MCG, llegando incluso a desaparecer en el RCP 8.5 ccsm4. Todos estos cambios proyectados en las de zonas de vida, van a tener un efecto en las

simulaciones futuras de producción de agua y erosión, debido a que las coberturas que se ingresan al modelo cambiarían.

3.2 Producción de agua al año 2070

La producción de agua (WYLD), está compuesta por los factores: escorrentía superficial (SURQ), flujo lateral (LATQ) y flujo de retorno o flujo base (GWQ). Para el año 2070, se proyecta que los factores del balance hídrico en la subcuenca del río Tempisquito varíen según el modelo y el escenario utilizado (Cuadro 11).

Cuadro 11. Balance hídrico y erosión para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 según cinco modelos de circulación general al año 2070, subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica

Escenario	Modelo	PREC	ET	SURQ	LATQ	GWQ	WYLD	SYLD
Línea base		2516,5	919,1	403,5	313,0	796,0	1512,5	122,2
RCP 4.5	ccsm4	2388,5	956,0	326,7	298,6	696,1	1321,4	105,3
	cesm1_cam5_1_fv2	2501,9	968,8	380,1	310,1	740,1	1430,2	137,7
	cnrm_cm5	2863,1	982,8	487,0	364,3	927,4	1778,7	169,7
	mpi_esm_lr	2972,8	965,5	561,5	375,6	971,1	1908,2	207,9
	mri_cgcm3	2976,4	977,7	553,6	378,0	958,6	1890,2	198,6
RCP 8.5	ccsm4	2027,0	954,0	225,6	242,6	483,7	951,8	64,5
	cnrm_cm5	2912,8	926,8	515,8	373,2	957,8	1846,7	187,2
	mpi_esm_lr	3216,0	979,8	673,9	405,9	1059,9	2139,7	293,3
	mri_cgcm3	3649,8	983,1	916,7	452,3	1198,6	2567,5	401,6

La suma de SURQ+LATQ+GWQ = Producción de agua (WYLD)

La precipitación simulada por QSWAT (PREC), en el escenario RCP 4.5 varía entre un -5,1% (ccsm4) y 18,3% (mri_cgcm3), con respecto a la precipitación del periodo 2008-2013. Por su parte, la evapotranspiración (ET), aumenta en todos los modelos de un 4,0% (ccsm4) a 6,9% (cnrm_cm5). En el escenario de emisiones RCP 8.5, la variación en todos los componentes del balance hídrico con respecto a la línea base es más drástica. Por ejemplo, la PREC varía entre -19,5% (ccsm4) y 45,0% (mri_cgcm3); además, la ET aumenta entre 0,8% (cnrm_cm5) y 7,0% (mri_cgcm3).

La producción de agua al año 2070 varía en el escenario RCP 4.5 desde -12,63% (ccsm4) hasta 26,16% (mpi_esm_lr). Por su parte, en el escenario RCP 8.5, esta variación va de -37,07% (ccsm4) a 69,75% (mri_cgcm3) con respecto al periodo 2008-2011. En la Figura 19 se observa espacialmente la producción de agua en milímetros para la línea base y 5 MCG según dos escenarios de emisiones al año 2070. La producción anual de agua de la línea base (2008-2013) va de los 940 mm en la parte baja de la subcuenca a los 1801 mm en la parte alta. En el escenario

RCP 4.5, el 60% de los modelos presentan mayor producción de agua que la línea base y en el RCP 8.5, el 75% producen más agua.

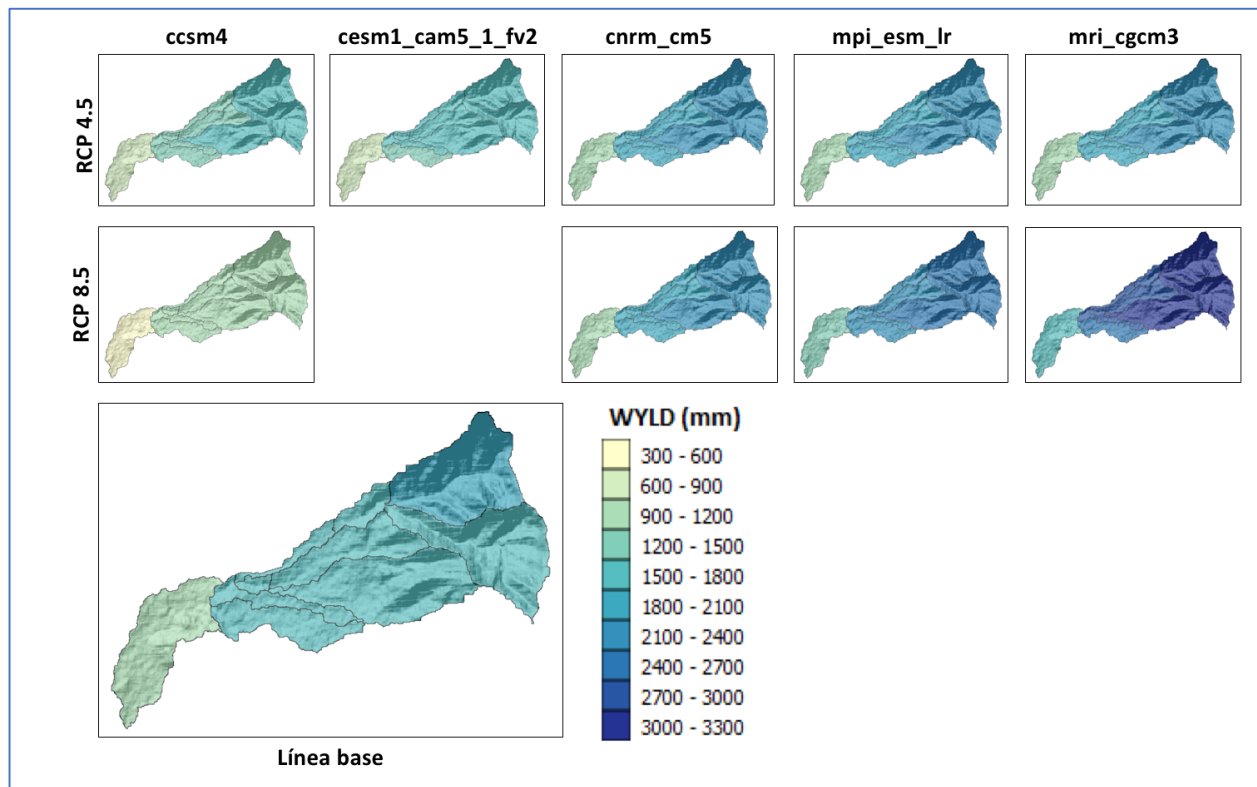


Figura 19. Producción de agua por microcuenca al año 2070 para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 según cinco modelos de circulación general, subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica

3.3 Erosión al año 2070

El 80,0% de los modelos del RCP 4.5 y el 75,0% de los del RCP 8.5, presentan mayores pérdidas por erosión con respecto a la línea base. La pérdida de suelo por erosión promedio para el periodo 2008-2013 es de $122,2 \text{ t ha}^{-1}\text{año}^{-1}$. En el escenario RCP 4.5 las variaciones de pérdidas por erosión van de -13,8% (ccsm4) hasta 70,1% (mpi_esm_lr), mientras que en el RCP 8.5 las variaciones son mayores y van desde una disminución del 47,2% (ccsm4), hasta un aumento del 228,5% (mri_cgcm3).

Tanto en la línea base como en todos los escenarios se observa una mayor producción de sedimento en la parte alta de la subcuenca (Figura 20), sobre todo en la microcuenca 1 que corresponde la ladera sur del volcán Orosí. Esta microcuenca se caracteriza por las altas pendientes, donde el 72,57% del área tiene pendientes mayores al 30%. En el otro extremo está la microcuenca 10 con la menor producción de sedimento en todos los escenarios, aquí las pendientes mayores al 30% apenas abarcan el 4,24% del área total.

Otro factor determinante en la producción de sedimento es la distribución de la precipitación en la subcuenca. Para el periodo 2008-2013 la precipitación de la parte alta de la subcuenca fue de 2851 mm, mientras que en la parte baja fue de 1920 mm. Entonces, la suma de factores como mayor pendiente y precipitación hacen que la producción de sedimentos sea mayor en la parte alta de la subcuenca.

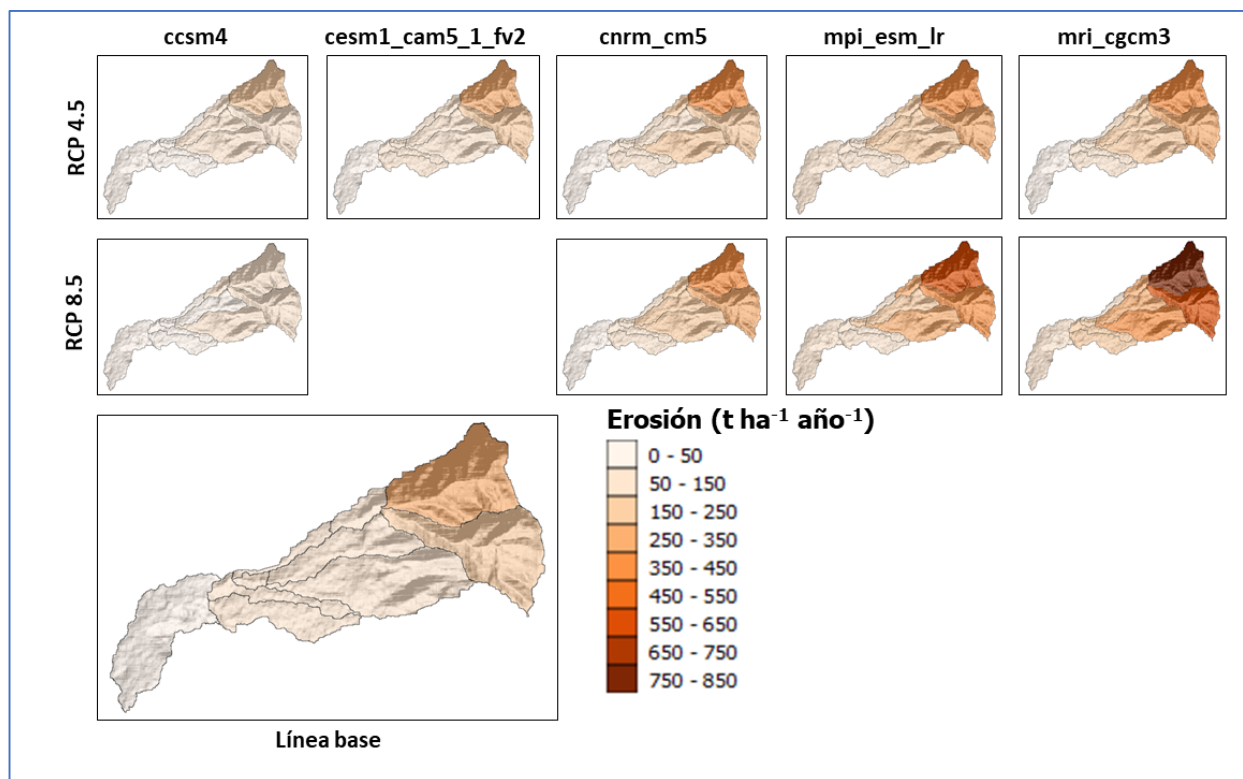


Figura 20. Erosión por microcuenca al año 2070 para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 según cinco modelos de circulación general, subcuenca del río Tempisquito, Guanacaste, Costa Rica

3.4 Distribución mensual del caudal y sedimentos

La simulación mensual del caudal y de los sedimentos a la salida de la subcuenca del río Tempisquito para la línea base y proyección futura se realizó bajo dos RCPs (4.5 y 8.5) y cinco MCG al 2070 (Figura 21).

En el caso del caudal, al igual que con la producción de agua, los MCG ccsm4 y cesm_cam5_1_fv2, presentan una disminución de caudal mensual en el escenario RCP 4.5 (-5,7% a -13%) y en el escenario RCP 8.5 (-37,4%) respecto al caudal correspondiente al periodo 2008-2013. Para los tres modelos restantes, se espera un aumento en el caudal promedio de entre 17,3% y 26,0% para el RCP 4.5 y de entre 21,7% y 69,3% para el RCP 8.5.

En todos los escenarios y MCG evaluados, el mes de octubre fue el que mayor caudal presentó; sin embargo, este caudal varía enormemente entre modelos. El menor caudal para el mes de octubre es del escenario RCP 8.5 ccsm4 ($0,91 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), mientras que el mayor se simuló en el escenario RCP 8.5 mri_cg3 ($3,39 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Un segundo pico de caudal se observa en julio; no obstante, este pico solamente se observa en los MCG cnrm_cm5, mpi_esm_lr y mri_cg3. Los demás modelos solamente presentan un pico en octubre. En el escenario RCP 4.5, el mes con mayor disminución de caudal fue junio en el 80% de los modelos; mientras que para el escenario RCP 8.5, el mes con mayor disminución de caudal proyectada es mayo para el 50% de los modelos. Entonces, según estos datos se esperaría un inicio más seco de la estación lluviosa. En cambio, los mayores aumentos en caudal, al menos en el RCP 4.5 no presentan una clara tendencia en el tiempo; por su parte en el RCP 8.5, los mayores aumentos de caudal se registran en los meses de noviembre (mpi_esm_lr y mri_cg3) y febrero (ccsm y cnrm_cm5).

En el caso de la producción de sedimentos, solamente el modelo ccsm4 en ambos RCP proyecta menos sedimentos, mientras que el resto de los modelos y escenarios tienden a una mayor carga a la salida de la subcuenca. En todos los modelos, independientemente si la producción de sedimentos es mayor o menor que la línea base, se nota un incremento en la carga durante los meses de enero a marzo; este incremento puede llegar hasta una 153,8% (RCP 8.5 mri_cg3). Por otra parte, en el mes donde comienzan las lluvias (mayo), se observa un descenso de la carga de sedimentos con respecto a la línea base de hasta un 65,4% (RCP 8.5 ccsm4).

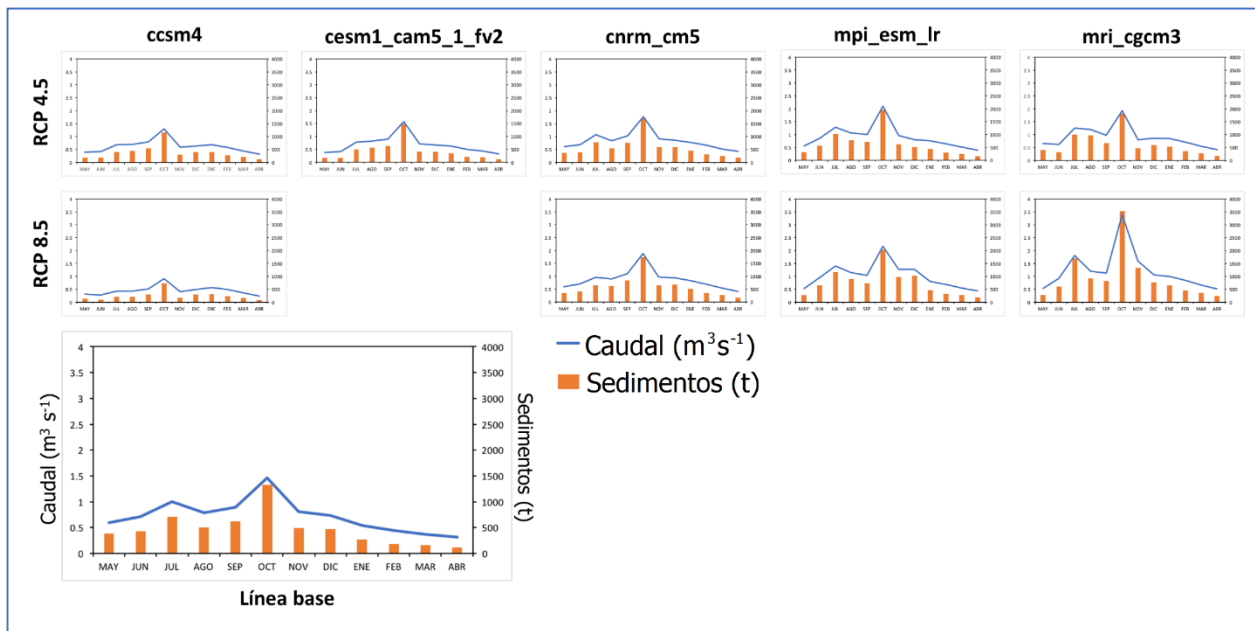


Figura 21. Caudal y sedimento mensual esperados en el año 2070 para los escenarios RCP 4.5 y 8.5 según 5 modelos de circulación general, subcuenca del río Tempisque, Guanacaste, Costa Rica

4. DISCUSIÓN

4.1 Zonas de vida de Holdridge

El entendimiento del ciclo hidrológico y como este se puede ver afectado con las condiciones cambiantes del clima, es un desafío en el siglo XXI. Comprender estos cambios en la variabilidad del recurso hídrico es sumamente importante para el desarrollo sostenible en muchas regiones del mundo (Li y Urban 2016). Estos cambios también ocurren a nivel de vegetación y de ecosistemas, lo cual afecta el consumo y la disponibilidad de agua para las plantas.

Con el sistema de zonas de vida de Holdridge, se puede describir de manera sencilla la vegetación que podría encontrarse en una determinada región del planeta según rangos establecidos de biotemperatura y de precipitación anual (Holdridge 1964; Holdridge *et al.* 1971). A raíz de los cambios esperados a futuro en el clima se deduce que también las zonas de vida van a desplazarse, modificando la distribución de especies en un sitio e incluso las tasas de captura de carbono de los ecosistemas (Khatun *et al.* 2013).

Yates *et al.* (2000), argumentan que, aunque los modelos mecanísticos son superiores que el sistema de zonas de vida de Holdridge a la hora de modelar la distribución de la vegetación en respuesta al cambio climático, el sistema de Holdridge puede utilizarse ante la limitada disponibilidad de información climática, acceso a otros modelos y a recursos computacionales.

La distribución futura de las zonas de vida de Holdridge en la subcuenca del río Tempisquito, concuerda con las modelaciones para Centroamérica realizadas por Jiménez *et al.* (2010). En ambos estudios, las zonas de vida modeladas que ganan área se encuentran en el piso basal. Este aumento ocurre principalmente por el incremento en las temperaturas en todos los escenarios; de esta manera, las zonas de vida ubicadas en el piso basal desplazan al resto de zonas de vida. Por otro lado, se observa que las zonas de vida del piso premontano son más vulnerables a desaparecer; ambas situaciones se observan en los escenarios modelados en este estudio.

El aumento del área de la zona de vida Bs-T en la mayoría de los modelos y escenarios futuros puede tener un efecto en la hidrología de la parte baja de la subcuenca del río Tempisquito. Mehan *et al.* (2016), citan que un aumento en las temperaturas acarrea mayores pérdidas de agua por evapotranspiración, provocando un ambiente más seco; esta pérdida representa una disminución en el flujo lateral y en el flujo base. Aunque en la parte alta de la subcuenca no hay gran cambio en las zonas de vida, las variaciones en la temperatura y distribución de la precipitación pueden aumentar la mortalidad del bosque. Al morir árboles, se producen claros en el bosque que afectan las tasas de erosión (Allen *et al.* 2010).

Khatun *et al.* (2013), reportan para el periodo 2070-2099 en Costa Rica, un aumento del 16% en el área de Bs-T para el escenario de emisiones A2 y un aumento del 6% en el escenario

A1B, según el modelo de circulación general ECHAM 5. Jiménez *et al.* (2010), en su modelación para Centroamérica, determinaron que las zonas de vida más afectadas en el futuro serán las que se encuentran en los pisos premontano y subalpino, además de variaciones en las provincias de humedad más secas. El desplazamiento de la vegetación hacia áreas más secas conlleva a un aumento de las especies caducifolias; Addis *et al.* (2016), mencionan que la falta de follaje al inicio de las lluvias puede agravar la erosión principalmente por falta de cobertura que amortigüe las gotas.

4.2 Producción de agua futura

El modelo SWAT es una herramienta muy utilizada para evaluar el efecto del cambio climático en los caudales dentro de una cuenca (Daniel *et al.* 2011). En muchos estudios realizados con SWAT, los escenarios climáticos futuros tienden a ser más cálidos y secos (Hidalgo *et al.* 2013; Mehan *et al.* 2016; Paparrizos y Matzarakis 2016; Shuai *et al.* 2017). Otros estudios apuntan a escenarios variados donde en algunas regiones se esperan sequías, mientras que en otras aumentarían las inundaciones (Gosain *et al.* 2006). Un común denominador en múltiples escenarios es el aumento de temperatura, mientras que las variaciones en precipitación son inciertas debido a los diversos modelos de circulación existentes y los patrones inciertos de precipitación para algunas regiones (Carvalho-Santos *et al.* 2017; Eisner *et al.* 2017).

En la subcuenca del río Tempisquito, los 5 MCG utilizados sugieren temperaturas más cálidas, principalmente en el escenario de emisiones RCP 8.5, mientras que la precipitación puede disminuir o aumentar según el modelo de circulación utilizado. En los modelos ccsm4 y cesm1_cam5_1_fv2, la precipitación fue menor que la del periodo base 1970-2000; en cambio, en los modelos cnrm_c5, mpi_esm_lr y mri_cg3, la precipitación fue mayor que la línea base. La tendencia de los modelos de circulación es similar al reportado por Carvalho-Santos *et al.* (2017), que estudiaron los impactos del cambio climático en los recursos hídricos de una cuenca de montaña en el noreste de Portugal. En ese estudio se utilizaron 4 MCG, tres de los cuales también se utilizaron en este trabajo, los modelos cnrm_c5 y mri_cg3 son en los que se esperaría un aumento de la precipitación en ambos estudios.

Por otra parte, Hidalgo *et al.* (2013), en sus proyecciones de escorrentía para 30 modelos de circulación general en Centroamérica, calcularon bajo el escenario de emisiones A1B que para el periodo 2050-2099, se proyecta una disminución en precipitación de 5-10% y una reducción de la escorrentía de 10-30%. En este estudio, solamente el escenario RCP 4.5 ccsm4 se encuentra en este rango de disminución de precipitación y de escorrentía superficial en el área de la subcuenca del río Tempisquito.

Centroamérica se caracteriza por su variada topografía y por estar influenciada climáticamente por el fenómeno El Niño, la Zona de Convergencia Intertropical y otros factores que provocan una gran variedad climática en la región (Sachs *et al.* 2009). En la zona donde se ubica la subcuenca del río Tempisquito se encuentran condiciones topográficas que hacen que el clima sea muy variable tanto espacial como temporalmente; esta variabilidad se refleja muy bien en las diferencias de los patrones de precipitación entre los modelos de circulación usados. Sin embargo, los modelos de circulación, al ser representaciones simplificadas, no pueden representar de manera exacta algunas características del clima, ya sea global o regional (Hidalgo y Alfaro 2015).

Kundu *et al.* (2017), en su estudio realizado en India sobre el cambio de uso del suelo y su impacto en el balance hídrico, encontraron cambios entre 1900 y 2011 en la evapotranspiración y en el número de curva que afectaron los componentes del balance hídrico durante ese periodo. Estos cambios se pueden esperar también en nuestras modelaciones; sin embargo, el origen de esas variaciones es diferente, ya que se espera que la subcuenca del río Tempisquito, al encontrarse dentro de un parque nacional, no tenga un cambio de uso del suelo. Entonces, las variaciones que sufra en el tiempo serán de carácter climático producto de las emisiones de gases de efecto invernadero y de las políticas futuras de mitigación.

El mayor efecto de cambios de cobertura proyectado para la subcuenca del río Tempisquito es una posible sustitución por especies caducifolias en la parte baja de la subcuenca, según las características más secas que pronostican algunos modelos y el aumento de temperatura en todos los modelos. Otro posible efecto en la vegetación, independiente si el escenario es más húmedo o seco que en la actualidad, son cambios fenológicos en las especies y su eventual dificultad de reproducción (Chmielewski y Rötzer 2001; Walther *et al.* 2002; Peñuelas *et al.* 2009).

4.3 Producción futura de erosión y sedimentos

Predecir la pérdida del suelo por erosión en el futuro es difícil; sin embargo, la tendencia se ve afectada principalmente por las variaciones en la precipitación y su distribución temporal (Ramos y Martínez-Casasnovas 2015). En nuestro estudio solamente el modelo de circulación ccsm4 muestra una disminución en las pérdidas de suelo por erosión y en la carga de sedimentos en el caudal. Los modelos cnrm_c5, mpi_esm_lr y mri_cg3, proyectan más precipitación en el sitio, más producción de agua, mayor erosión y producción de sedimentos.

El caso del modelo cesm1_cam5_1_fv2, RCP 4.5 es diferente; aunque la precipitación es ligeramente menor a la del periodo base y se proyecta una reducción de la producción de agua del 5,4%, la erosión no disminuye, sino que aumenta un 12,6%. Este aumento ocurriría principalmente en los meses de estación seca (enero-abril), y en los meses de mayor precipitación (septiembre-octubre). Addis *et al.* (2016), señalan que el efecto de la precipitación al inicio de la estación lluviosa tiene un gran efecto en suelos descubiertos, muy propensos a la erosión. Esto puede ocurrir en la parte baja de la subcuenca donde se proyecta que el bosque seco tropical

domine esa área. Dos patrones encontrados en todos los modelos fueron el aumento de la erosión en los meses más secos y la disminución en el mes de mayo, donde se esperaría que esta aumente, lo cual es producto de las anomalías de precipitación en los modelos de circulación.

Entonces, al utilizar MCG como insumos para simular la erosión futura en SWAT, las variaciones en erosión y sedimentos dentro de una cuenca van a ocurrir tanto por el aumento de caudal producto de la precipitación, como por su distribución temporal (Tan *et al.* 2017), donde dependiendo de los modelos utilizados, estos valores pueden aumentar o disminuir (Zhang *et al.* 2007; Mouri *et al.* 2013; Mukundan *et al.* 2013).

5. CONCLUSIONES

- Se calcularon las anomalías de precipitación y temperatura de dos escenarios de emisiones RCP 4.5 y RCP 8.5 según cinco MCG al año 2070. En todas las simulaciones se proyectan mayores temperaturas y precipitaciones en el futuro, a excepción de dos modelos de los RCP 4.5 y 8.5, donde se proyecta una disminución en la precipitación.
- Con respecto a las zonas de vida modeladas al año 2070, se espera una disminución en la cantidad para todos los escenarios con respecto a la línea base 1970-2000. También se espera una variación en el área de las mismas, donde el bosque seco tropical y el bosque húmedo tropical son las zonas de vida que ganan más extensión, mientras que las zonas de vida del piso premontano serán desplazadas hacia mayores elevaciones.
- Se proyecta que la producción de agua futura varíe en el escenario RCP 4.5 entre -12,63% y 26,16% y en el RCP 8.5 entre -37,07% y 69,75% con respecto al periodo 2008-2013. Además, se espera que en el 80% de los modelos según un RCP 4.5 y en el 75% de los modelos según el RCP 8.5, se dé un aumento en la producción de agua.
- En cuanto a la erosión, se espera que varíe entre -13,8% y 70,1% para el escenario RCP 4,5 y entre -47,2% y 228,5% para el RCP 8.5, con respecto al periodo 2008-2013. También se espera que la erosión aumente en el 80% de los modelos del RCP 4,5 y en el 75% de los del RCP 8,5. Factores como la cantidad y distribución de la precipitación modifican la erosión en los escenarios futuros.
- En casi todos los escenarios y modelos se dio un aumento de caudal y sedimentos en los meses de estación seca y un descenso del caudal al inicio de las lluvias, además de otro aumento de ambos en el mes de octubre. Estas variaciones son producto de las anomalías de precipitación de los modelos.

6. RECOMENDACIONES

- Debido al tamaño de la subcuenca se recomienda utilizar modelos de circulación con una mayor reducción de escala, o encontrar un ensamble de modelos que represente de mejor manera las anomalías climáticas locales.
- Se pueden utilizar otros métodos para simular la vegetación futura que utilicen otras variables además de temperatura y precipitación; los modelos mecanísticos pueden ser una buena opción.
- Los datos aquí mostrados pueden ser utilizados para identificar zonas más sensibles al cambio climático y a la erosión; así se pueden tomar medidas localizadas de mitigación y adaptación.
- Estudios de esta índole contribuyen a un mejor entendimiento del comportamiento futuro de la producción de agua y sedimentos, lo cual tiene un efecto en los servicios ecosistémicos que brindan las áreas protegidas como el PNG.

7. LITERATURA CITADA

- Addis, HK; Strohmeier, S; Ziadat, F; Melaku, ND; Klik, A. 2016. Modeling streamflow and sediment using SWAT in Ethiopian Highlands. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering* 9(5):51-66.
- Allen, CD; Macalady, AK; Chenchouni, H; Bachelet, D; McDowell, N; Vennetier, M; Kitzberger, T; Rigling, A; Breshears, DD; Hogg, EH; Gonzalez, P; Fensham, R; Zhang, Z; Castro, J; Demidova, N; Lim, J-H; Allard, G; Running, SW; Semerci, A; Cobb, N. 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259(4):660-684.
- Alpizar, E. 2007. Vulnerabilidad de bosques ante cambio climático puede simularse con sistema de zonas de vida. *Ambientico* 165:28-30.
- Amador, JA; Alfaro, EJ; Lizano, OG; Magaña, VO. 2006. Atmospheric forcing of the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography* 69(2-4):101-142.
- Araújo, MB; Rahbek, C. 2006. How does climate change affect biodiversity? *Science* 313:1396-1397.
- Ashiq, MW; Zhao, C; Ni, J; Akhtar, M. 2010. GIS-based high-resolution spatial interpolation of precipitation in mountain–plain areas of Upper Pakistan for regional climate change impact studies. *Theoretical and Applied Climatology* 99(3-4):239-253.
- Brown, DP; Comrie, AC. 2002. Spatial modeling of winter temperature and precipitation in Arizona and New Mexico, USA. *Climate Research* 22:115-128.
- Carvalho-Santos, C; Monteiro, AT; Azevedo, JC; Honrado, JP; Nunes, JP. 2017. Climate Change Impacts on Water Resources and Reservoir Management: Uncertainty and Adaptation for a Mountain Catchment in Northeast Portugal. *Water Resources Management* 31(11):3355-3370.
- Chen, X; Zhang, X-S; Li, B-L. 2003. The possible response of life zones in China under global climate change. *Global and Planetary Change* 38(3-4):327-337.
- Chmielewski, FM; Rötzer, T. 2001. Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology* 108:101-112.
- Daniel, EB; Camp, JV; LeBoeuf, EJ; Penrod, JR; Dobbins, JP; Abkowitz, MD. 2011. Watershed Modeling and its Applications: A State-of-the-Art Review. *The Open Hydrology Journal* 5:26-50.
- Eisner, S; Flörke, M; Chamorro, A; Daggupati, P; Donnelly, C; Huang, J; Hundecha, Y; Koch, H; Kalugin, A; Krylenko, I; Mishra, V; Piniewski, M; Samaniego, L; Seidou, O; Wallner, M; Krysanova, V. 2017. An ensemble analysis of climate change impacts on streamflow seasonality across 11 large river basins. *Climatic Change* 141(3):401-417.
- Fick, SE; Hijmans, RJ. 2017. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 37(12):4302-4315.
- Ficklin, DL; Luo, Y; Luedeling, E; Zhang, M. 2009. Climate change sensitivity assessment of a highly agricultural watershed using SWAT. *Journal of Hydrology* 374(1-2):16-29.
- Githui, F; Gitau, W; Mutua, F; Bauwens, W. 2009. Climate change impact on SWAT simulated streamflow in western Kenya. *International Journal of Climatology* 29(12):1823-1834.

- Gleick, PH. 1989. Climate change, hydrology, and water resources. *Reviews of Geophysics* 27(3):329-344.
- Gosain, AK; Rao, S; Basuray, D. 2006. Climate change impact assessment on hydrology of Indian river basins. *Current Science* 90(3):346-353.
- Hidalgo, HG; Alfaro, EJ. 2015. Skill of CMIP5 climate models in reproducing 20th century basic climate features in Central America. *International Journal of Climatology* 35(12):3397-3421.
- Hidalgo, HG; Amador, JA; Alfaro, EJ; Quesada, B. 2013. Hydrological climate change projections for Central America. *Journal of Hydrology* 495:94-112.
- Hijmans, RJ; Cameron, SE; Parra, JL; Jones, PG; Jarvis, A. 2005. Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25(15):1965-1978.
- Holdridge, LR. 1964. *Life Zone Ecology*. San José, Costa Rica, Centro Científico Tropical. 206 p.
- Holdridge, LR; Grenke, WC; Hatheway, WH; T. Liang; Tosi, JA. 1971. *Forest environments in tropical life zones*. Oxford, United Kingdom, Pergamon Press. 747 p.
- Jyrkama, MI; Sykes, JF. 2007. The impact of climate change on spatially varying groundwater recharge in the grand river watershed (Ontario). *Journal of Hydrology* 338(3-4):237-250.
- Khatun, K; Imbach, P; Zamora, J. 2013. An assessment of climate change impacts on the tropical forests of Central America using the Holdridge Life Zone (HLZ) land classification system. *iForest - Biogeosciences and Forestry* 6(4):183-189.
- Kundu, S; Khare, D; Mondal, A. 2017. Past, present and future land use changes and their impact on water balance. *J Environ Manage* 197:582-596.
- Li, Y; Urban, M. 2016. Water Resource Variability and Climate Change. *Water* 8(8):348.
- Ly, S; Charles, C; Degré, A. 2013. Different methods for spatial interpolation of rainfall data for operational hydrology and hydrological modeling at watershed scale. A review. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment* 17(2):392-406.
- Jiménez, M; Cain, A; Locatelli, B. 2010. Efectos del cambio climático en la distribución de zonas de vida en Centroamérica. *Recursos Naturales y Ambiente* 59-60:32-40.
- Ma, X; Xu, J; Luo, Y; Prasad Aggarwal, S; Li, J. 2009. Response of hydrological processes to land-cover and climate changes in Kejie watershed, south-west China. *Hydrological Processes* 23(8):1179-1191.
- Mehan, S; Kanan, N; Neupane, R; McDaniel, R; Kumar, S. 2016. Climate Change Impacts on the Hydrological Processes of a Small Agricultural Watershed. *Climate* 4(4):56.
- Mendoza, F; Chévez, M; González, B. 2001. Sensibilidad de las zonas de vida de Holdridge en Nicaragua en función del cambio climático. *Revista Forestal Centroamericana* 33:17-22.
- Mouri, G; Golosov, V; Chalov, S; Takizawa, S; Oguma, K; Yoshimura, K; Shiiba, M; Hori, T; Oki, T. 2013. Assessment of potential suspended sediment yield in Japan in the 21st century with reference to the general circulation model climate change scenarios. *Global and Planetary Change* 102:1-9.
- Mukundan, R; Pradhanang, SM; Schneiderman, EM; Pierson, DC; Anandhi, A; Zion, MS; Matonse, AH; Lounsbury, DG; Steenhuis, TS. 2013. Suspended sediment source areas and future climate impact on soil erosion and sediment yield in a New York City water supply watershed, USA. *Geomorphology* 183:110-119.

- Narsimlu, B; Gosain, AK; Chahar, BR. 2013. Assessment of Future Climate Change Impacts on Water Resources of Upper Sind River Basin, India Using SWAT Model. *Water Resources Management* 27(10):3647-3662.
- Paparrizos, S; Matzarakis, A. 2016. Assessment of future climate change impacts on the hydrological regime of selected Greek areas with different climate conditions. *Hydrology Research* 48(5):1327-1342.
- Peñuelas, J; Rutidhauser, T; Filella, I. 2009. Phenology Feedbacks on Climate Change. *Science* 324(5929):887-888.
- Portillo-Quintero, C; Sanchez-Azofeifa, A; Calvo-Alvarado, J; Quesada, M; do Espirito Santo, MM. 2015. The role of tropical dry forests for biodiversity, carbon and water conservation in the neotropics: lessons learned and opportunities for its sustainable management. *Regional Environmental Change* 15(6):1039-1049.
- Praskievicz, S; Chang, H. 2009. A review of hydrological modelling of basin-scale climate change and urban development impacts. *Progress in Physical Geography* 33(5):650-671.
- Ramos, MC; Martínez-Casasnovas, JA. 2015. Climate change influence on runoff and soil losses in a rainfed basin with Mediterranean climate. *Natural Hazards* 78(2):1065-1089.
- Sachs, JP; Sachse, D; Smittenberg, RH; Zhang, Z; Battisti, DS; Golubic, S. 2009. Southward movement of the Pacific intertropical convergence zone AD 1400–1850. *Nature Geoscience* 2(7):519-525.
- Shi, P; Chen, C; Srinivasan, R; Zhang, X; Cai, T; Fang, X; Qu, S; Chen, X; Li, Q. 2011. Evaluating the SWAT Model for Hydrological Modeling in the Xixian Watershed and a Comparison with the XAJ Model. *Water Resources Management* 25(10):2595-2612.
- Shuai, L; Hong, W; Yuan, L; Wenchao, M; Yanwen, G; Yue, P; Changxiao, L. 2017. Runoff prediction for Ningxia Qingshui River Basin under scenarios of climate and land use changes. *Acta Ecologica Sinica* 37(4):1252-1260.
- Singh, VP; Woolhiser, DA. 2002. Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering* 7:270-292.
- Tan, ML; Ibrahim, AL; Yusop, Z; Chua, VP; Chan, NW. 2017. Climate change impacts under CMIP5 RCP scenarios on water resources of the Kelantan River Basin, Malaysia. *Atmospheric Research* 189:1-10.
- Tosi, JA. 1964. Climatic control of terrestrial ecosystems: a report on the Holdridge model. *Economic Geography* 40(2):173-181.
- Yates, DN; Kittel, TGF; Cannon, RF. 2000. Comparing the correlative Holdridge model to mechanistic biogeographical models for assessing vegetation distribution response to climatic change. *Climatic Change* 44:59-87.
- Vicente-Serrano, SM; Saz-Sánchez, MA; Cuadrat, JM. 2003. Comparative analysis of interpolation methods in the middle Ebro Valley (Spain): application to annual precipitation and temperature. *Climate Research* 24:161-180.
- Walther, GR; Post, E; Convey, P; Menzel, A; Parmesan, C; Beebee, TJC; Fromentin, JM; Hoegh-Guldberg, O; Bairlein, F. 2002. Ecological responses to recent climate change. *Nature* 416:389-395.

- Wang, S; Kang, S; Zhang, L; Li, F. 2008. Modelling hydrological response to different land-use and climate change scenarios in the Zamu River basin of northwest China. *Hydrological Processes* 22(14):2502-2510.
- Zhang, X; Srinivasan, R; Hao, F. 2007. Predicting hydrologic response to climate change in the Luohe River Basin using the SWAT model. *Transactions of the ASABE* 50(3):901-910.