

DOI: 10.24850/j-tyca-2021-06-09

Artículos

**Impacto del cambio climático y cambio de
uso/cobertura de la tierra en la respuesta hidrológica y
erosión hídrica en la subcuenca del río Quiscab**

**Impact of the climate change and the land use/land
cover change in the hydrological and water erosion
response in the Quiscab River subbasin**

Giovanni González-Celada¹, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1815-4978>

Ney Ríos², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7785-4413>

Laura Benegas-Negri³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1890-0213>

Freddy Argotty-Benavides⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8002-7905>

¹Instituto Privado de Investigación sobre Cambio Climático, Escuintla, Guatemala, ggonzalez@icc.org.gt

²Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica, ney.rios@catie.ac.cr

³Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Turrialba, Costa Rica, laura.benegas@catie.ac.cr

⁴Ministerio del Ambiente, Magdalena del Mar, Perú, fargotty@minam.gob.pe

Autor para correspondencia: Giovanni González-Celada, ggonzalez@icc.org.gt, edio.gonzalez@catie.ac.cr

Resumen

Este estudio determina el impacto del cambio climático y cambio de uso/cobertura de la tierra en la respuesta hidrológica y erosión hídrica de la subcuenca Quiscab, su área aproximada es 149.7 km². Se usa el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool). Se considera una línea base (1994-2015); un escenario de cambio climático RCP 8.5, modelo HadGEM2-ES al 2050; y dos escenarios hipotéticos de cambio de uso/cobertura (-80 % bosque, y +50 % bosque). Con el programa SWAT-CUP se hace la calibración en dos puntos. Los puntos de calibración presentan comportamiento hidrológico distinto entre caudales simulados y observados. El punto con menor intervención el ajuste hidrológico fue muy bueno (NS = 0.77; KGE = 0.87). El punto en sector de mayor intervención el ajuste hidrológico no fue satisfactorio (NS = -5; KGE = -0.8). Bajo los escenarios evaluados se prevé que el mayor impacto en la respuesta hidrológica y erosión hídrica será ocasionado por el cambio

climático. La producción de agua y erosión hídrica prevé reducirse hasta un 40 y 20 %, respectivamente. Si bien los datos observados son limitados, temporal y espacialmente, se logró simular el ciclo hidrológico y estimar la erosión hídrica; resalta la importancia de la instrumentación espacial y temporal de las cuencas nacionales.

Palabras clave: modelación hidrológica, simulación, respuesta hidrológica, erosión hídrica, modelo SWAT, cambio climático.

Abstract

The following study determines the impact of climate change and the land use/land cover change in the hydrological and water erosion response in the Quiscab sub-basin, its approximate area is 149.7 km². The SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model is used. It is considered a baseline (1994-2015); a Climate change scenario RCP 8.5, HadGEM2-ES model up to 2050; and two hypothetical scenarios of the land use/land cover change (-80 % forest and +50 % forest). With the SWAT-CUP program, calibration is done in two sites. The site with the least intervention shows a good hydrological performance (NS = 0.77; KGE = 0.87). The site of the most intervention shows a non-satisfactory hydrological performance (NS = -5; KGE = -0.8). Based on the evaluated scenarios, it is predicted that the highest impact in the hydrological and water erosion response will be caused by climate change. The production of water and water erosion is predicted to be reduced up to 40 and 20 %, respectively. Even though

the observed data is limited, temporarily and spatially, it was possible to simulate the hydrological cycle and estimate the water erosion; highlighting the importance of the spatial instrumentation and temporary of the national basins.

Keywords: Hydrological modeling, simulation, hydrological response, water erosion, SWAT model, climate change.

Recibido: 19/06/2020

Aceptado: 30/11/2020

Introducción

El agua juega roles en distintos procesos y se complica definirla en una categoría específica de servicio ecosistémico (Vörösmarty *et al.*, 2005); por ello podría considerársele un servicios ecosistémico transversal, dada

su habilidad para establecer la sostenibilidad de los ecosistemas vivos (Ripl, 2003).

La subcuenca del río Quiscab es uno de los dos principales ríos que drenan hacia el lago de Atitlán (MAGA-DIGEGR, 2013), y está dentro de la Reserva de Uso Múltiple de la Cuenca del Lago Atitlán (CONAP, 2007). Dicho lago es uno de los lagos más importantes del mundo (Rejmánková, Komárek, Dix, Komárková, & Girón, 2011), que se formó por un ciclo de erupciones llamado Los Chocoyos (Newhall, 1987). Últimamente el lago de Atitlán ha presentado problemas de incremento de contaminación del agua dadas las cargas de contaminantes que impactan negativamente y aceleran la eutrofización (Dix, Fortin, & Medinilla, 2003; Hernandez *et al.*, 2011; Komárek *et al.*, 2013; Rejmánková *et al.*, 2011).

Imbach, Molina, Locatelli y Corrales (2010) afirman que en el ámbito Mesoamericano la producción de agua potable es vulnerable al reducirse la precipitación a futuro, lo cual afecta el acceso a servicios ecosistémicos hidrológicos por el posible impacto del cambio climático; esto, como resultado de probables alteraciones de las condiciones hidrológicas del lugar (Zhang, Srinivasan, & Hao, 2007). Se estima que el cambio climático continuará su avance y se debe estar preparado para adaptarse y ser resiliente (Locatelli, 2014). Se prevé que Guatemala incrementará su temperatura entre 1 y 3 °C de 2010 a 2060, con cambios de hasta 75 mm de precipitación (Oglesby & Rowe, 2014).

Por otro lado, existe evidencia de que tanto el cambio climático como el cambio de uso/cobertura de la tierra son impulsores de cambio

directo en los ecosistemas, ocasionando transformaciones en la tasa de dotación de servicios ecosistémicos (Carpenter *et al.*, 2009; MEA, 2005). El cambio de cobertura de la tierra juega un papel importante en el ciclo hidrológico, pues procesos como la evapotranspiración dependen del tipo de cobertura, clima y capacidad de agua disponible para la planta, entre otros (Fitts, 2012; McNaughton & Jarvis, 1983; Zhang, Dawes, & Walker, 2001; Zhang, Walker, & Dawes, 1999), además de poder incrementar la escorrentía superficial o atenuarla. Bajo este contexto conocer la dinámica del ciclo hidrológico y erosión hídrica en la subcuenca del río Quiscab ante cambios futuros del clima y de uso/cobertura de la tierra es necesario.

Este estudio pretende determinar la respuesta hidrológica y erosión hídrica ante el cambio climático y cambio de uso/cobertura de la tierra en la subcuenca del río Quiscab, Guatemala. Para tal fin se utilizó el modelo SWAT (Arnold, Srinivasan, Muttiah, & Williams, 1998; Neitsch, Arnold, Kiniry, Williams, & King, 2005), el cual tiene la capacidad de incorporar anomalías climáticas y cambios de cobertura en el proceso de simulación (Neitsch *et al.*, 2005). Es un modelo operacional o conceptual (Arnold *et al.*, 1998; Zhang, 2014) semidistribuido (Arnold *et al.*, 2012) y de tiempo continuo a escala de cuenca, que opera en intervalos de tiempo diario; fue desarrollado para evaluar y predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo en la generación de agua, sedimentos, nutrientes y sustancias químicas agrícolas (Arnold *et al.*, 2012; Arnold *et al.*, 1998; Gassman, Reyes, Green, & Arnold, 2007; Neitsch *et al.*, 2005).

Arnold *et al.* (1998) mencionan que el modelo SWAT no requiere calibración para cumplir con su objetivo de predicción, esta es una realidad en cuencas con pobre instrumentación. El modelo SWAT simula los procesos hidrológicos en dos etapas: la primera es la fase terrestre del ciclo hidrológico (cantidad) y con base en ecuación de balance de masa; la segunda etapa consiste en el enrutamiento o conducción de las cargas simuladas en la fase terrestre hacia la red hídrica o reservorios (Arnold *et al.*, 2012; Neitsch *et al.*, 2005; Zhang, 2014).

Métodos

Área de estudio

La subcuenca del río Quiscab ($14^{\circ} 48' 32.9''$ N, $91^{\circ} 13' 51.89''$ O), pertenece a la cuenca del lago Atitlán de la vertiente del Pacífico, y posee

un área de 149.7 km², que representa el 28 % de la cuenca del lago en mención (Figura 1).

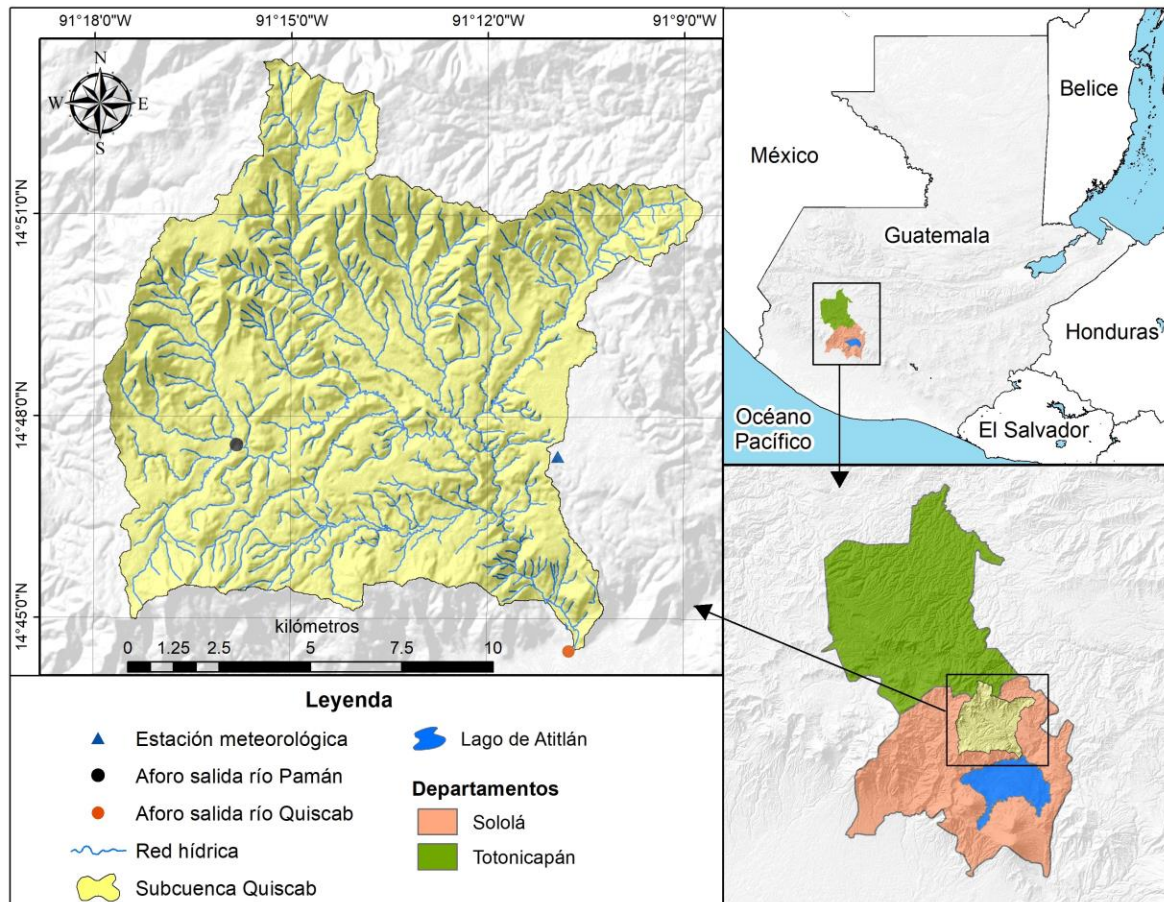


Figura 1. Ubicación del área de estudio, subcuenca río Quiscab, cuenca lago Atitlán, Guatemala.

Su clima, según Thornthwaite, va de frío húmedo a semicálido muy húmedo (MAGA-DIGEGR, 2013; UPGGR-MAGA, 2009). Comprende tres zonas de vida de Holdridge: bosque muy húmedo montano subtropical (bmh-M); bosque muy húmedo montano bajo subtropical (bmh-MB), y el bosque húmedo montano bajo subtropical (bh-MB). El 35 % de su superficie corresponde a bosque; 38.6 %, a granos básicos; 4.8 %, a hortalizas; 1.3 % a pastos; 18.3 %, matorrales, y 0.1 %, a lugares con poca vegetación (GIMBUT, 2014; INAB & CONAP, 2015; MAGA-DIGEGR, 2015).

Datos para el modelo SWAT

La simulación con el modelo SWAT requirió información climática y biofísica que se obtuvo de diferentes fuentes (Tabla 1). En cuanto al uso/cobertura local se reclasificó según la base de datos de SWAT. Se completó las variables de suelo con los programas *Soil Water Characteristic*, desarrollado por Saxton y Rawls (2006), y NumCur, para estimar variables de suelo no contenidas en las fuentes citadas. La estadística de las variables climáticas se calculó con la Macro 4.1 de

Microsoft Excel®. La información topográfica, de cobertura, suelos, clima y caudales fue sistematizada y analizada para configurar el modelo SWAT.

Tabla 1. Datos utilizados para configurar el modelo SWAT.

Variable	Información	Fuente
Topografía	Modelo de elevación digital (1:50 000), resolución espacial 20 m	MAGA, 2010
Uso/cobertura de la tierra	Mapa de bosques y uso de la tierra 2012 (1:50,000), mapa forestal por tipo y subtipo de bosque (1:50,000), y mapa de cobertura vegetal y uso de la tierra de la República de Guatemala (1:50 000)	GIMBUT, 2014; Inab & Conap, 2015; MAGA-DIGEGR, 2015
Tipo de suelo	Estudio semidetallado de los suelos del departamento de Sololá (1:50 000)	MAGA-DIGEGR, 2013
Clima	Estación meteorológica El Tablón, variables precipitación pluvial y temperatura (mínima y máxima). Periodo 1994-2015	INSIVUMEH, 2016

Caudal mensual	Datos de aforos de río Quiscab y Pamán. Periodos: 15 meses (entre 2013 y 2014) y 12 meses (entre 2007 y 2008)	URL-UNR-UVG-DRI-UCD, 2014; Xicay, 2011
Cambio climático	Plataforma MarkSim®, escenario de cambio climático RCP 8.5, y modelo HadGEM2-ES para el año 2050. Anomalías mensuales de precipitación y temperatura	Jones & Thornton, 2013

Configuración y simulación modelo SWAT

El estudio se realizó con la extensión ArcSWAT 2012.10 (Winchell, Srinivasan, Di-Luzio, & Arnold, 2013) para el programa ArcGis® versión 10.2 (Esri Inc., 2014). Se definieron siete microcuencas para la subcuenca del río Quiscab y un periodo de calentamiento de tres años. El traslape único de topografía, suelo y vegetación generó las unidades de respuesta hidrológica (URH); la pendiente se categorizó según la clasificación de FAO (2009). Es así como el modelo SWAT —considerando los dos niveles

de heterogeneidad espacial, subcuencas y URH (Zhang, 2014)— simula el ciclo hidrológico en cada una de estas unidades, para luego combinarlas y calcular el balance hídrico en cada cuenca. El ciclo hidrológico es simulado según la ecuación dada a continuación, la cual define el contenido final de agua en el suelo en función del contenido inicial de agua en el suelo (SW_0), tiempo (t), precipitación (R_{day}), escorrentía (Q_{surf}), evapotranspiración (E_a), percolación en el perfil del suelo (w_{seep}), y flujo de retorno (Q_{gw}); todos lo anteriores en escala diaria y en milímetros (Neitsch *et al.*, 2005):

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

Por su lado, la erosión hídrica se calcula con la ecuación universal de pérdida de suelo modificada (MUSLE, por sus siglas en inglés) por Williams (1975a):

$$SYLD = 11.8 * (Q_{surf} * q_{peak} * area_{urh})^{0.56} * K_{USLE} * C_{USLE} * P_{USLE} * LS_{USLE} * CFRG$$

Donde $SYLD$ es la erosión en un día dado (t); Q_{surf} , la escorrentía superficial ($\text{mm H}_2\text{O ha}^{-1}$); q_{peak} , la tasa máxima de escorrentía ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); $area_{urh}$, el área de la URH (ha); K_{USLE} , el factor USLE de erodabilidad del

suelo; C_{USLE} , el factor USLE de cobertura y gestión; P_{USLE} , el factor USLE de práctica de soporte; LS_{USLE} , el factor USLE topográfico, y $CFRG$ es el factor de fragmento macro. No se consideraron prácticas de conservación de suelo.

Previo a calibrar se realizaron ajustes de parámetros para lograr la mejor simulación de referencia o inicial. Se definió el método de Hargreaves y Samani (1985) para la evapotranspiración potencial. La curva número inicial (CN) se varió según las condiciones locales de la vegetación (condición hidrológica) y grupo hidrológico de los suelos (Cronshey, 1986). El coeficiente de rugosidad (n) de Manning para flujo superficial se modificó para cada categoría de cobertura según Engman (1986). Finalmente, la rugosidad del canal principal y tributarios se modificó por el método tabular de Manning (Chow, 1994). Estableciéndose así la simulación inicial, que posteriormente fue sometida a calibración con la variable caudal medio mensual según se describe en la sección siguiente.

Calibración y análisis de incertidumbre

El análisis de sensibilidad, calibración y análisis de incertidumbre se realiza con el algoritmo SUFI-2 (Abbaspour, Johnson, & Van Genuchten, 2004; Abbaspour *et al.*, 2007) incluido en el programa SWAT-CUP (Abbaspour, 2015). Dicho algoritmo realiza modelado inverso semiautomatizado, y combina optimización (calibración y análisis de sensibilidad) y análisis de incertidumbre (Abbaspour *et al.*, 2004; Abbaspour *et al.*, 2007), el cual cuantifica la incertidumbre de las salidas del modelo con la banda de predicción de incertidumbre del 95 % (95 PPU) a dos colas, a través de muestreo por método hipercubo latino. Para medir la bondad de ajuste de la calibración utiliza las reglas de P-factor y R-factor; la primera es la fracción de los datos observados más su error contenido en la banda 95 PPU, varía de 0 a 1; la segunda es la fracción entre la distancia media de los valores mínimos y máximos de la banda 95 PPU, y la desviación estándar de los datos observados (Abbaspour *et al.*, 2004; Abbaspour *et al.*, 2015; Abbaspour *et al.*, 2007).

La calibración se ejecutó con la variable caudal mensual y se realizó en dos puntos: uno en el río Pamán y otro en la desembocadura del río Quiscab. En el primer punto, el periodo de calibración fue de abril de 2014 a agosto de 2015, y para la desembocadura del río Quiscab, además del mismo periodo del río Pamán, se agregó otro registro (de septiembre de 2007 a agosto de 2008). La función objetivo que se utilizó para evaluar el ajuste hidrológico de la calibración fue el criterio de Kling-Gupta (Gupta, Kling, Yilmaz, & Martinez, 2009):

$$KGE = 1 - ED$$

$$D = \sqrt{(r - 1)^2(\alpha - 1)^2 + (\beta - 1)^2}$$

Donde ED es la distancia euclídea desde el punto ideal; β , el cociente entre la media de la simulación y la media de valores observados, representa el sesgo; α , cociente entre las desviaciones estándar de la simulación y los datos observados, representa la variabilidad; r , el coeficiente de correlación lineal entre los datos simulados y los observados (Abbaspour, 2015; Gupta *et al.*, 2009). Se calcularon otros estadísticos de ajuste: Nash-Sutcliffe (NS); porcentaje de sesgo (PBIAS), y el ratio RSR o estandarización de la raíz del error cuadrático medio.

Se calcularon 600 simulaciones en dos iteraciones y se usó el método de sensibilidad global para definir las variables de mayor sensibilidad en la calibración del caudal. Los 12 parámetros de calibración se definieron con base en revisión de literatura (Abbaspour, 2015; Abbaspour *et al.*, 2015; Arnold *et al.*, 2012; Marcinkowski, Piniewski, Kardel, Giełczewski, & Okruszko, 2013; Me, Abell, & Hamilton, 2015; Rostamian *et al.*, 2008; Santhi, Kannan, Arnold, & Di-Luzio, 2008; Singh, Bankar, Salunkhe, Bera, & Sharma, 2013) y la sensibilidad global (Tabla 2).

Tabla 2. Parámetros usados para la calibración en dos puntos de la subcuenca Quiscab.

Parámetro	Descripción	Rango de calibración
r__CN2.mgt	Curva número para condición de humedad II	-0.17 a 0.03
r__SOL_AWC().sol	Capacidad de agua disponible en el suelo, mm/mm suelo	-0.15 a 0.03
v__GW_REVAP.gw	Coeficiente de retorno de agua del acuífero a la zona de raíces	0.07 a 0.24
v__ALPHA_BF.gw	Factor alfa de la curva de recesión de agua subterránea del acuífero profundo, 1/días	0.34 a 1.0
v__GW_DELAY.gw	Tiempo de retardo para recarga del acuífero, días	0.00 a 243.97
v__ESCO.URH	Factor de compensación de evaporación del suelo	0.20 a 0.75
v__CH_N2.rte	Coeficiente “n” de Manning para el canal principal	0.14 a 0.30
r__SOL_K().sol	Conductividad hidráulica saturada, mm/h	-0.80 a -0.0066
v__CH_K1.sub	Conductividad hidráulica efectiva en el canal tributario, mm/h	17.18 a 55.32

v_RCHRG_DP.gw	Coeficiente de percolación del acuífero profundo.	0.40 a 1.00
r_SLSUBBSN.URH	Longitud de pendiente promedio, m	0.09 a 1.00
r_SOL_BD().sol	Densidad aparente del suelo, g/cm ³	-0.10 a 0.14

Escenario de cambio climático y cambio de uso/cobertura de la tierra

Posterior a la calibración se incorporaron escenarios prospectivos, uno de cambio climático y dos de cambio de uso/cobertura de la tierra, los cuales fueron comparados con el escenario base (1994-2015), y se consideraron cambios relativos y la variabilidad asociada. Para cada escenario, la siguiente configuración del modelo SWAT no fue modificada: topografía, tipo de suelo, y división de cuencas.

El escenario de cambio climático supone que la distribución espacial de la precipitación, temperatura y uso de la tierra son constantes; mientras que la distribución espacial de precipitación no cambia. Es así como se evalúa el escenario RCP 8.5 al año 2050. Se seleccionó este

escenario por los criterios siguientes: es el más crítico del CMIP5 (Cubasch *et al.*, 2013); similitud en forzamiento radiativo (Meinshausen *et al.*, 2011), y en anomalía de temperatura con los otros escenarios (RCP 4.5 y RCP 6.0) (Collins *et al.*, 2013); al año 2050. Además, el último año de la simulación base fue el más caliente en la superficie global de la tierra (Hansen, Sato, Ruedy, Schmidt, & Lo, 2016; WMO, 2016), y en Guatemala, al 2015, se reporta que las estaciones monitoreadas presentaron mayores frecuencias (días) con temperaturas medias diarias superiores al promedio en el periodo 1981-2010 (Amador, Hidalgo, Alfaro, Durán-Quesada, & Calderón, 2016).

Se usó el Modelo de Circulación General (GCM) HadGEM2-ES (Hadley Centre Global Environmental Model versión 2, Earth System Model) (Collins *et al.*, 2011; Jones *et al.*, 2011; Martin *et al.*, 2011), con reducción de escala por el método estadístico de la plataforma MarkSim® (Jones & Thornton, 2013).

La elección de este modelo se debe a que se ubica en el tercio de modelos con mayor magnitud ($> 66\%$) de la anomalía de temperatura, considerando los 17 modelos de MarkSim®; de allí que es probable que las anomalías de este modelo sucedan (Stocker *et al.*, 2013). El modelo HadGEM2-ES incluye componentes de la atmósfera, océano, estratósfera y del sistema terrestre (Earth-System, ES); este último contiene la dinámica de la vegetación, biología del océano y química de la atmósfera (Jones *et al.*, 2011; Martin *et al.*, 2011).

Para la dinámica de cambio de uso/cobertura de la tierra (CUCT) se plantearon dos escenarios hipotéticos: a) reducción del 80 % (CUCT 1); b) e incremento del 50 (CUCT 2) de la superficie de bosque. En la configuración del modelo SWAT, el clima no fue modificado. Estos escenarios están representados por la dinámica entre bosque y pastos, matorrales y lugares con poca vegetación; esta conversión fue establecida por la proximidad espacial. El uso de escenarios hipotéticos de cambio de uso/cobertura de la tierra y de cambio climático se aplica en varios estudios donde se utiliza el modelo SWAT (Chen, Ale, Rajan, Morgan, & Park, 2015; Gassman *et al.*, 2007; Morán-Tejeda *et al.*, 2015; Qi, Sun, Wang, McNulty, & Myers, 2009; Zhang, Nan, Xu, & Li, 2016).

Resultados

Calibración del modelo SWAT

De los dos puntos de calibración, la mejor fuerza de calibración y evaluación de incertidumbre la presentó el río Pamán, dado su valor de P-factor próximo al 70 % recomendado por Abbaspour *et al.* (2015) para la variable descarga. También los criterios NS, RSR y PBIS presentaron valores muy buenos según escala propuesta por Moriasi *et al.* (2007); el criterio de Kling-Gupta tuvo un comportamiento muy bueno, dado que sus tres componentes: sesgo, variabilidad y correlación lineal fueron cercanos a su valor óptimo (1) (Figura 2).

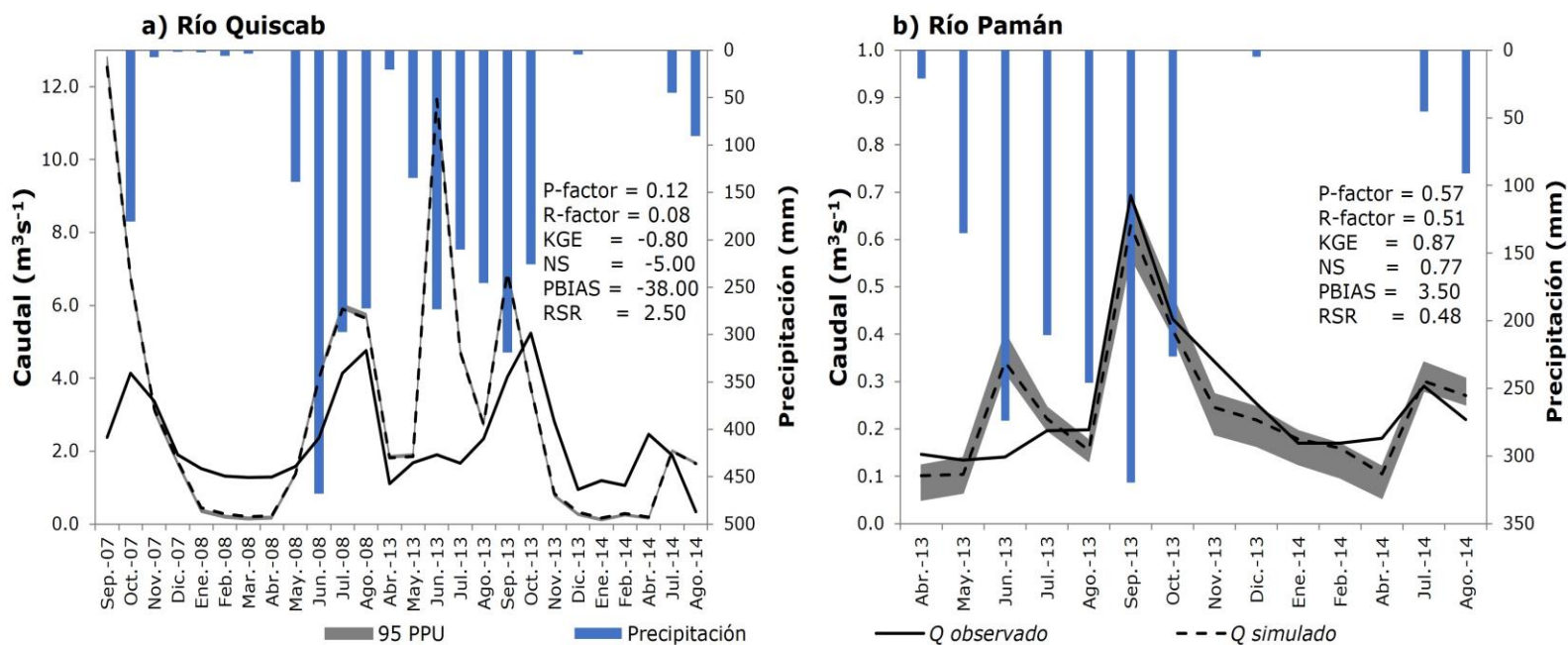


Figura 2. Calibración de modelo SWAT en la subcuenca del río Quiscab.

En cuanto a la sensibilidad de los parámetros sujetos a calibración, 8 de los 12 presentaron la mayor sensibilidad ($p \leq 0.05$) al ajuste de la descarga: conductividad hidráulica saturada, curva número, conductividad hidráulica efectiva del canal tributario, factor de compensación de evaporación del suelo, coeficiente de percolación del acuífero profundo, longitud de pendiente promedio, capacidad de agua disponible en el suelo y densidad aparente del suelo.

Efecto del cambio climático en la respuesta hidrológica y erosión hídrica

Durante el escenario base (1994-2015) en la subcuenca del río Quiscab, el aporte medio anual de la precipitación pluvial fue igual a $1\,472 \pm 276.4$ mm; mientras, la producción de agua fue de 696 ± 224.2 mm; escorrentía superficial de 234 ± 113.5 mm; flujo lateral de 316 ± 74 mm; flujo base de 61 ± 31.2 mm; percolación de 150 ± 75.3 mm, y erosión hídrica de 26.8 ± 15 t ha⁻¹ año⁻¹; la mediana de la evapotranspiración actual fue de

749.6 mm (724.4-781.0). Entretanto, el caudal simulado medio anual en la salida de la subcuenca del río Quiscab fue de $3.3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Para el año 2050, bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 del modelo HadGEM2-ES, se sugieren cambios anuales de -23 %, -6 %, -40 % y -51 % para precipitación pluvial (PRECIP), evapotranspiración actual (ET), producción de agua (WYLD) y percolación (PERC), respectivamente. La recarga hídrica (GW_RCHG) disminuiría 48 % y la erosión hídrica (SYLD) se prevé experimentará una reducción anual del 20 %. A escala mensual multianual se prevé el mayor cambio de las variables hidrológicas PRECIP, ET, y WYLD en -100, -19 y -68 %, respectivamente (Figura 3). La recarga y erosión hídrica prevé su mayor cambio en -86 y -100 %, respectivamente.

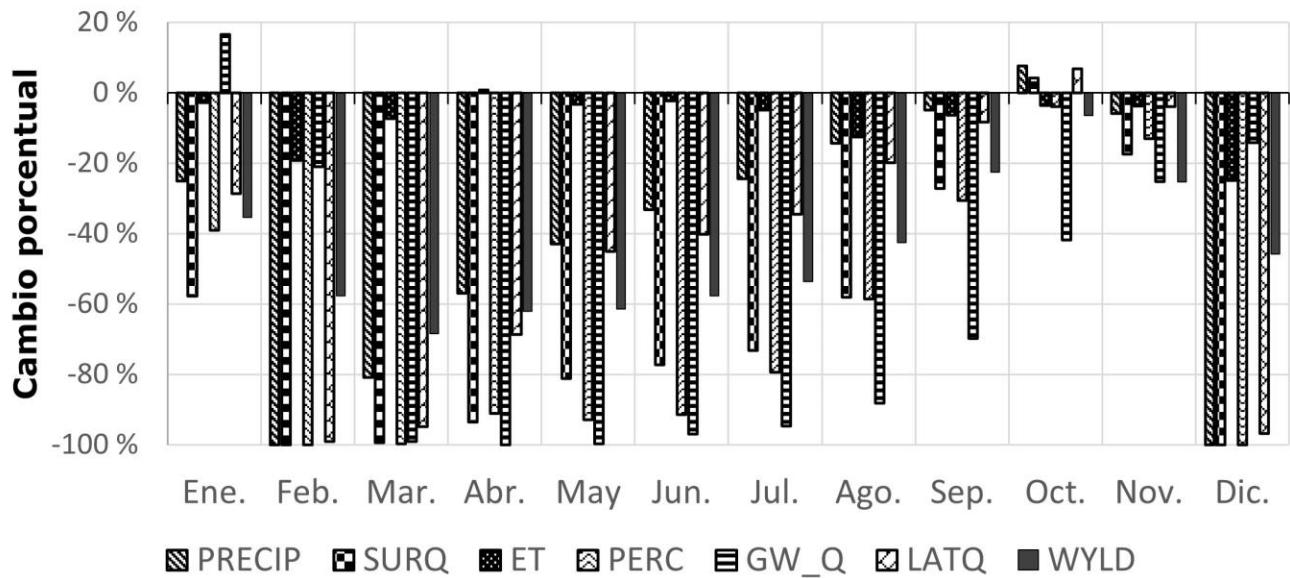


Figura 3. Cambio porcentual promedio mensual de las fracciones del balance hídrico ante cambio climático al 2050.

A lo largo del año con el escenario RCP 8.5 al 2050 se espera que la variabilidad se incremente de manera leve para ET, PRECIP y flujo lateral (LATQ) (6-15 %); moderada para escorrentía superficial (SURQ), WYLD y GW_RCHG (entre 15 y 35 %), y severa para PERC, flujo base (GW_Q) y SYLD (> 35 %), todas con respecto a la línea base. El cambio espacial de los componentes del balance hídrico, producción de agua y erosión hídrica se presenta en la Figura 4, donde se observa el efecto del escenario de cambio climático, y se prevé reducción generalizada de estas variables hidrológicas y erosión hídrica.

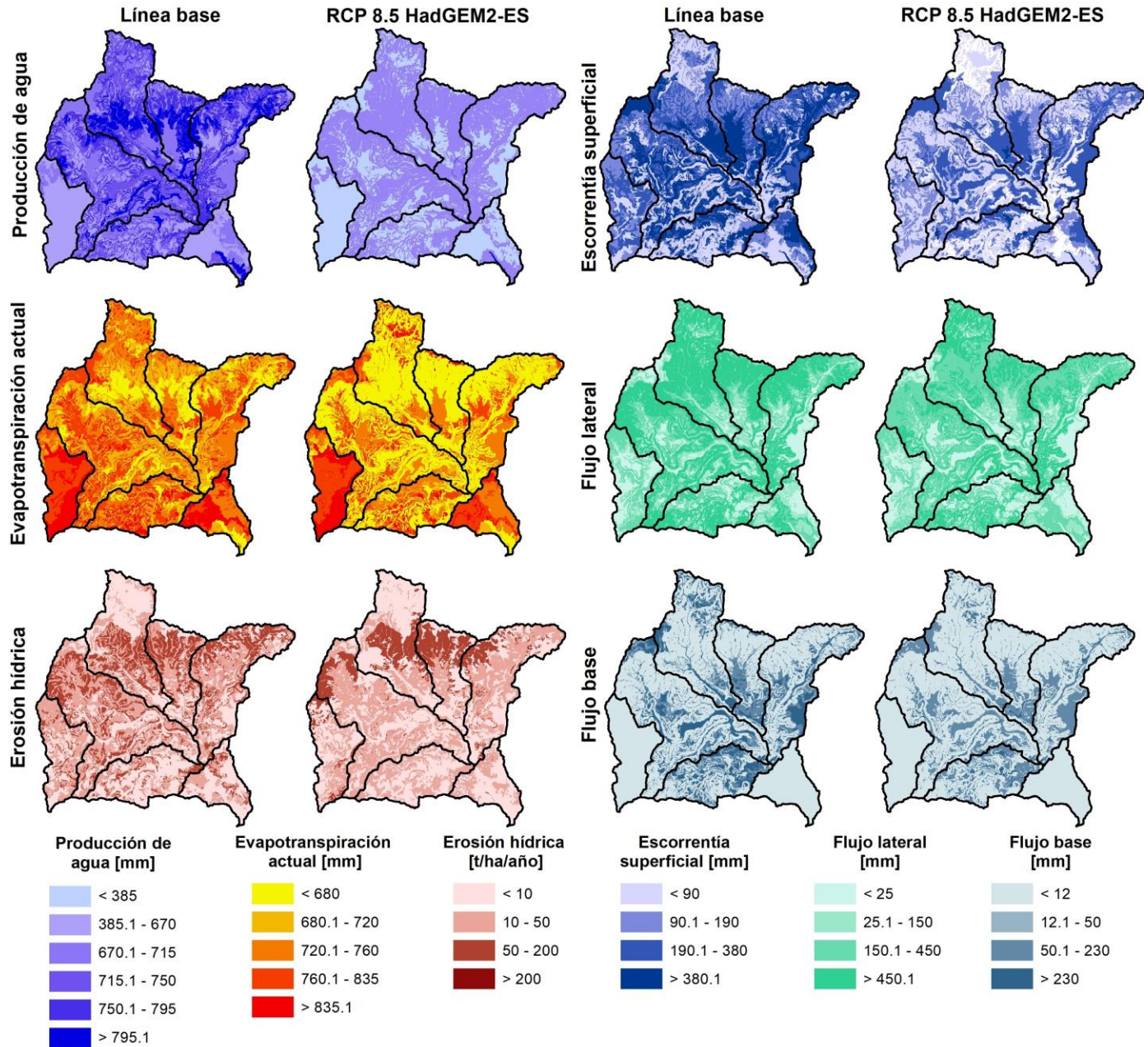


Figura 4. Respuesta hidrológica y erosión hídrica ante cambio climático en subcuenca del río Quiscab.

Efecto del cambio de uso/cobertura en la respuesta hidrológica y erosión hídrica

El posible cambio anual bajo el escenario de CUCT 1 (-80 % bosque) sería -3 % para ET; por su lado, WYLD, SURQ, LATQ, GW_Q, recarga y erosión hídrica se prevé cambiarán +3, +4, -1, +10, -1 y +10 %, respectivamente. En promedio a escala mensual multianual, los mayores cambios para las variables ET, WYLD, SURQ, GW_Q serán -36, +5, +8 y +24 %, respectivamente (Figura 5). La recarga y erosión hídrica sugieren sus mayores cambios en el orden de +10 y +61 %, respectivamente. La variabilidad (coeficiente de variación) a lo largo del año presentará cambios muy leves (< 6 %) para las variables SURQ, PERC, GW_Q, LATQ, WYLD y GW_RCHG; leves para ET (entre 6 y 15 %), y moderados para la erosión hídrica (entre 15 y 35 %).

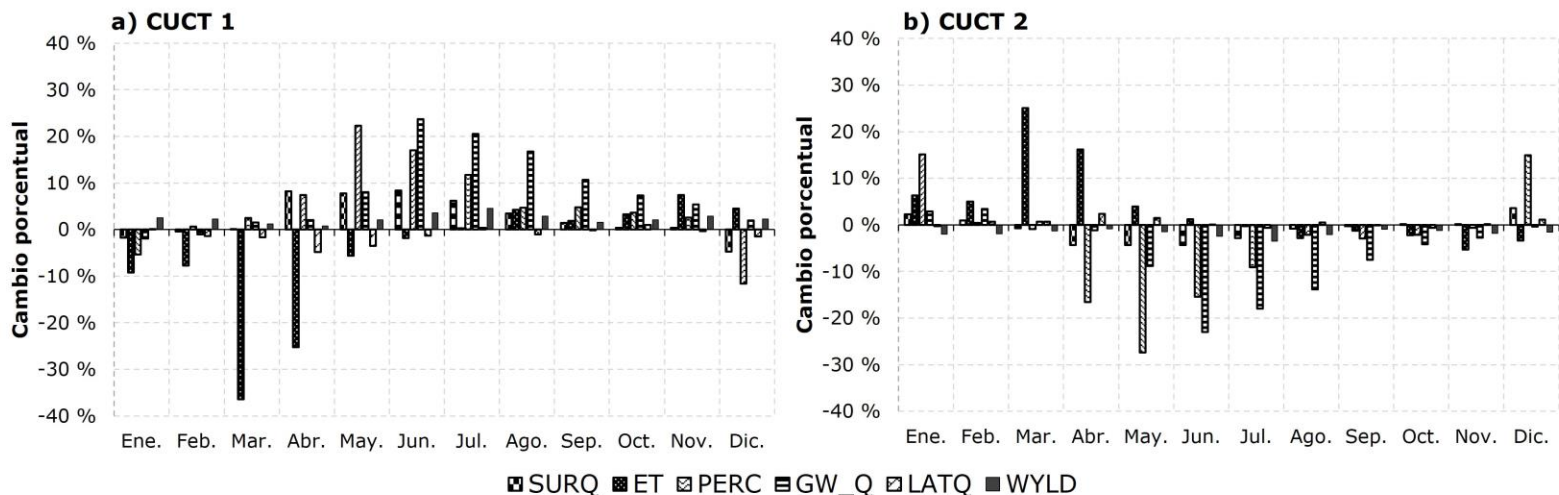


Figura 5. Cambio porcentual promedio mensual de las fracciones del balance hídrico ante dos escenarios de cambio de cobertura.

Se sugieren cambios promedio anuales bajo el escenario de CUCT 2 (+50 % bosque), donde ET incrementaría 2 %, SURQ -2 %, GW_Q -8 %, y WYLD -2 %, recarga -14% y erosión hídrica -1 %. LATQ no experimentaría cambio en el balance anual. Con respecto al cambio promedio mensual (Figura 5), se prevén los mayores cambios para las variables ET, WYLD, SURQ, LATQ, y GW_Q, en +25, -3, -4, -23 +2 %, respectivamente. La recarga hídrica presentará su mayor cambio de -28 %, y la erosión hídrica en +34 %. La variabilidad durante el año de las fracciones del balance y la erosión hídrica se sugiere presentaría cambios muy leves ($CV < 6 \%$).

La dinámica espacial de los componentes del balance hídrico, producción de agua y erosión hídrica se presenta para los dos escenarios hipotéticos de cambio de uso/cobertura, donde es evidente que el escenario -80 % de la cobertura bosque (CUCT 1) provocaría incremento en producción de agua, escorrentía superficial, flujo base y erosión hídrica. La evapotranspiración real presenta reducción. El escenario de incremento de 50 % del bosque (CUCT 2) se prevé reduciría la escorrentía superficial, flujo base, producción de agua y erosión hídrica, con un incremento de la evapotranspiración real (Figura 6).

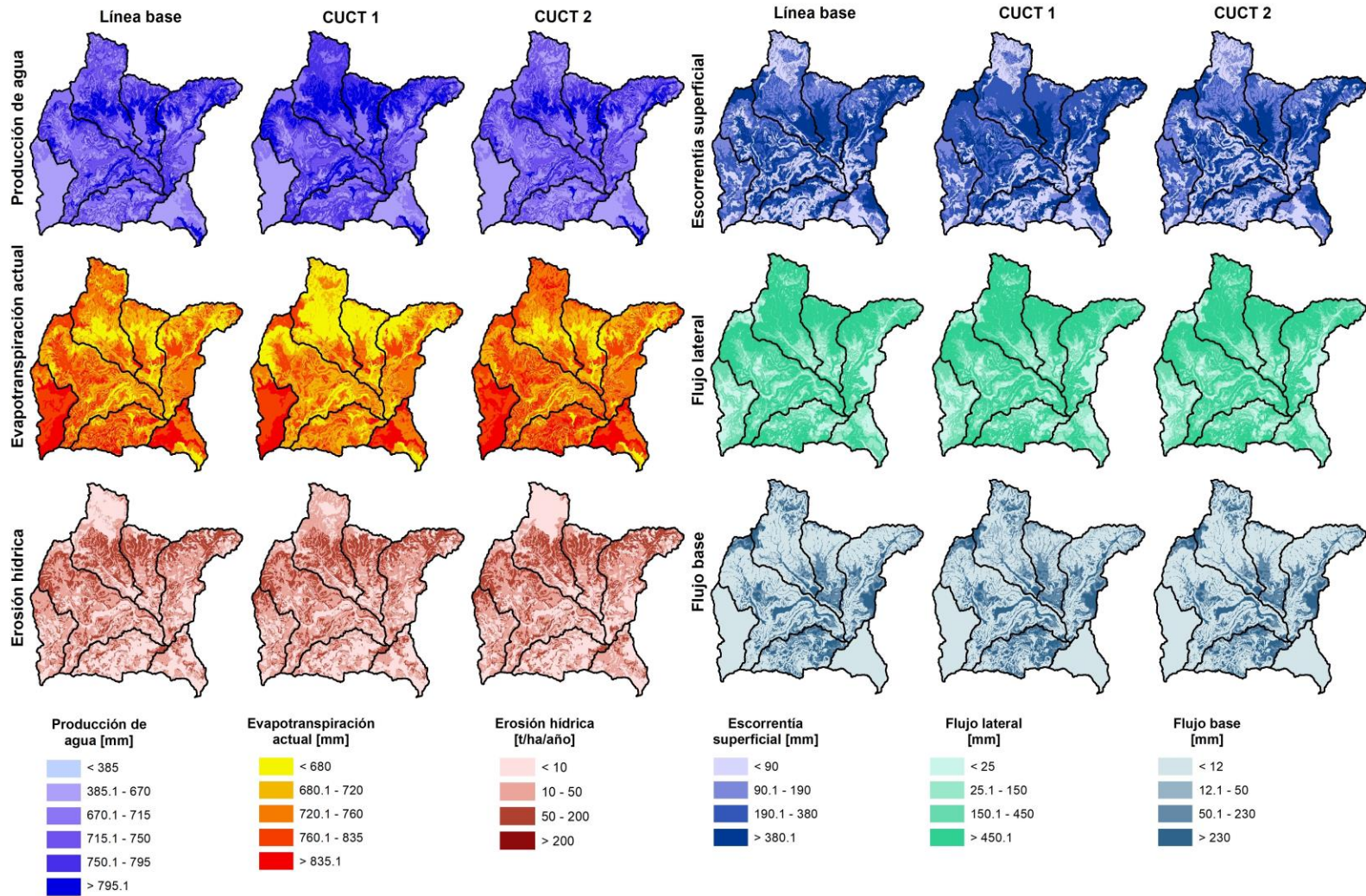


Figura 6. Respuesta hidrológica y erosión hídrica ante cambios de cobertura de la tierra en subcuenca del río Quiscab.

Discusión

Calibración del modelo SWAT

La falta de ajuste entre caudales simulados y observados en un punto de calibración indica falta de emparejamiento general. Se utilizó el enfoque de calibración multisitio (Cao, Bowden, Davie, & Fenemor, 2006), sin embargo los datos observados de caudal (también de lluvia) disponibles son de limitado detalle espacial, contrario a lo que recomiendan Zhang, Srinivasan y Van Liew (2008) para este enfoque, lo cual resulta en una limitada calibración espacial (Arnold *et al.*, 2012) y salidas enmascaradas del modelo (Takken *et al.*, 1999), pues el buen ajuste en un punto (río Pamán) no se reflejó en la calibración en la salida del río Quiscab; además, la distribución temporal de caudales observados es pobre. Estas limitaciones espacio-temporales de datos, caudal y clima conducen a errores en los modelos de simulación (Refsgaard & Storm, 1996), lo que se confirma con los factores de evaluación de incertidumbre, que reflejan la mala calidad de los datos observados (Abbaspour *et al.*, 2007).

Las condiciones morfométricas (densidad de drenaje, tiempo de concentración) de la subcuenca Quiscab propician su alta eficiencia en evacuar la lluvia que recibe, dada su baja permeabilidad y rápida respuesta hidrológica (Horton, 1932), lo que se presenta en altos valores de caudal en época lluviosa. Además, la alta carga de sedimentos transportados en su lecho en eventos de tormenta hace difícil establecer puntos de aforo fijos (Hernández-Moreno, Álvarez-Nuñez, Girón, & Gutiérrez-López, 2011). Al adicionar en el análisis la ubicación del punto de aforo, hora de medición y acceso al punto de aforo, la incertidumbre del instrumento y personal dificultan la toma de datos que reflejen de modo adecuado la descarga natural del río; ello se traduce en errores registrales de valores observados (Refsgaard & Storm, 1996).

Aunque el modelo conceptual de SWAT permite considerar la extracción de agua (Neitsch *et al.*, 2005), y así mejorar la calibración de caudales, no se dispone de un registro histórico de puntos de aforo y monitoreo en la subcuenca, situación observada en el recorrido de campo. La extracción es un factor para considerar a monitorear debido que la fuente principal de acceso hídrico en esta zona es a través de ríos y manantiales (IARNA-URL, 2013).

Dadas las limitaciones de datos observados para calibración, característica típica de cuencas poco instrumentadas, se alcanzó un ajuste bueno de calibración de caudal en un punto de la subcuenca Quiscab. Lo positivo fue evidenciar la variabilidad espacial de la variable caudal debido a que en una microcuenca (Pamán) poco intervenida la calibración fue

satisfactoria, situación que no se presentó en otro punto de alta intervención. Se evidencia que la información de uso, consumo y gestión es necesaria en zonas de alta intervención.

Efecto del cambio climático en la respuesta hidrológica y erosión hídrica

Al incorporar la anomalía clima, precipitación y temperatura, se esperaba que los otros componentes del ciclo del agua se modifiquen, pues la precipitación es el principal componente de este ciclo (Brutsaert, 2005; Davie, 2008; Han, 2010) y la temperatura es uno de los componentes que gobierna la evapotranspiración (Fitts, 2012), donde la fracción transpiración es el proceso de mayor pérdida de agua de la cuenca (Fetter, 2000). Los cambios moderados a severos que se prevén en la respuesta hidrológica y erosión hídrica de la subcuenca Quiscab se deben en gran medida a la reducción de la tasa de evapotranspiración por la disminución de la capacidad de agua disponible en el suelo y la intercepción vegetal y se desconoce la capacidad de amortiguamiento natural del ecosistema local.

En cuanto a la variabilidad del régimen anual de los componentes del balance hídrico, se incrementará, y con ello los cambios en época seca y lluviosa podrán ver un incremento de problemas de estrés hídrico y escasez de agua (Arnell, 2004; Revenga, Brunner, Henninger, Kassem, & Payne, 2000); cambio de aptitud agrícola (Bouroncle *et al.*, 2016); e impactos en agua potable (Imbach *et al.*, 2010), y en otros servicios hidrológicos del ecosistema.

En comparación con otros estudios, con el uso del modelo SWAT se revelan respuestas hidrológicas variables ante el efecto de cambio climático en otras latitudes. Por ejemplo, en EUA, para dos cuencas de Idaho, se proyectan caudales máximos en el rango de -198 y $+106 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, predominando anomalías positivas de precipitación y temperatura; en una de las cuencas prevalece cobertura forestal y, en la otra, cobertura diversa (Jin & Sridhar, 2012). Chien, Yeh y Knouft (2013), lo cual sugiere una reducción del caudal anual entre 41.1 y 45.2 % para el periodo 2051-2060 para cuatro cuencas del río Mississippi, donde destaca el uso agrícola (> 68 %).

En la cuenca del río Nilo Azul, Koch y Cherie (2013) estimaron que ante el escenario A2 los mayores cambios de precipitación, producción de agua y evapotranspiración fueron -13, -45 y -2 %, respectivamente. Igualmente en África, Awotwi, Kumi, Jansson, Yeboah y Nti (2015) mostraron que la esorrentía superficial, flujo base y evapotranspiración incrementarían 26, 24 y 6 %, respectivamente, ante cambio climático. En la India, Pandey, Gosain, Paul y Khare (2016) cuantificaron que ante

cambio climático en la cuenca Armur, la evapotranspiración y producción de agua incrementarán 28 y 49 %, respectivamente. En Chile, Stehr, Debels, Arumi, Alcayaga y Romero (2010) modelaron en la cuenca del río Biobío que ante cambio climático el caudal disminuye entre 32 y 45 %.

La erosión promedio anual de la subcuenca Quiscab actualmente es moderada según la clasificación de FAO (1980). Esta categoría, en gran medida, se debe a las características geomorfológicas y de paisaje del área de estudio (MAGA-DIGEGR, 2013). La erosión promedio simulada en la línea base, $26.8 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, se asemeja al promedio entre erosión potencial y erosión potencial por sobreuso en la subcuenca Quiscab ($24 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$) estimada por Pineda (2009). En la subcuenca Quiscab, la combinación de malas prácticas de conservación de suelo y vegetación, al combinarse con las características inherentes geomorfológicas, exacerban la erosión en la zona, sin olvidar que la subcuenca está por alcanzar el equilibrio del ciclo de erosión de acuerdo con el criterio de Strahler (1957).

En esta subcuenca, la erosión hídrica se prevé tenga una reducción de 20 % debido a que los factores decisivos, lluvia y escorrentía superficial, disminuyeron 23 y 51 %, respectivamente, resultando en pérdidas de suelo menores a la línea base (FFTC, 1995; Morgan, 1997). La disminución de la escorrentía superficial es clave, pues el método de estimación de la erosión utilizado, MUSLE, usa dicha variable como factor de energía (Williams, 1975a; Williams, 1975b). También la anomalía de precipitación juega un rol importante, dado que la cantidad e intensidad

de lluvia son los factores que controlan los cambios de erosión ante cambio climático (Nearing, Pruski, & O'neal, 2004).

Similarmente a este estudio y con el uso del modelo SWAT, en Vietnam, Khoi y Suetsugi (2013) proyectan que ante cambio climático (escenario A1B) al 2050, la producción de sedimentos se reducirá 1.4 %. De la misma manera, en China, Yu, Xie y Meng (2017) prevén reducción de hasta 1.4 Mt mes⁻¹, en el periodo 2049-2064, bajo los modelos ESM2M, HadGEM2 y CM5A del CMIP5. Opuestamente, en Vietnam, Khoi y Suetsugi (2013) indican que para el 2080, los sedimentos aumentarán 4.5 % ante una subida de temperatura promedio de 2.9 °C. De igual forma, Thai, Thao y Dieu (2017) estiman incremento de la pérdida de suelo desde 6.2 (2020-2039) hasta 25.5 % (2080-2100).

Para la erosión hídrica, las prácticas de conservación del suelo pueden jugar un rol protagónico en el control de las fases erosivas de desprendimiento y transporte de suelo (Morgan, 1997), como son los residuos vegetales que cubren el suelo (Cogo, Moldenhauer, & Foster, 1984; Jin *et al.*, 2008; Jordán, Zavala, & Gil, 2010); medidas agronómicas a mantener e incrementa la densidad de cobertura vegetal (Fullen, Guerra, Jorge, & Alexandre, 2014); y métodos mecánicos de conservación de suelos, como terrazas, cortinas rompevientos y barreras de protección, entre otras (Fullen *et al.*, 2014; Morgan, 1997).

Efecto del cambio de uso/cobertura en la respuesta hidrológica y erosión hídrica

En los escenarios hipotéticos de cambio de uso/cobertura de la tierra planteados existen cambios anidados de los componentes del ciclo hidrológico, tal es el caso de la evapotranspiración real (ET), la cual es calculada por el modelo SWAT en función de la evaporación del agua interceptada por el dosel, y tasas máximas de transpiración del dosel y evaporación del suelo (Neitsch *et al.*, 2005). Considerando que la ET es el factor clave para entender el efecto en la producción de agua del cambio de cobertura (Morán-Tejeda *et al.*, 2015), se deben entender los elementos que constituyen este flujo, como temperatura, área foliar, radiación y albedo de la superficie, entre otros (Fitts, 2012; McNaughton & Jarvis, 1983; Zhang *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 1999).

Por consiguiente, al reducir la cobertura de bosque 80 % (CUCT 1), se disminuyó el área foliar potencial, índice de área foliar e interceptación; por lo tanto, se redujo la evapotranspiración. Esto se presenta dado que el área foliar está relacionada con la interceptación y radiación, y define el área foliar disponible para evapotranspiración (Zhang *et al.*, 1999), por lo que, el agua que se dejó de evapotranspirar (-3 %) e interceptar favoreció los otros flujos del ciclo del agua, incrementando la escorrentía superficial,

flujo base y, en consecuencia, la producción de agua, pues la vegetación afecta la escorrentía superficial por los cambios de intercepción y evapotranspiración (Zhang *et al.*, 2001; Zhang *et al.*, 1999).

Asimismo, al darse un cambio de cobertura también se modifica la curva número (CN), y con ello cambian la escorrentía y producción de agua debido a que en este estudio se utiliza el método de la CN para generar escorrentía, tal como lo demuestran Kundu, Khare y Mondal (2017) en la relación entre cambios de CN y producción de agua.

Similar a la respuesta que se prevé en la subcuenca Quiscab, en Carolina del Norte, EUA, Qi *et al.* (2009) muestran la reducción de la evapotranspiración (7 %) y un incremento de la producción de agua (14 %) ante un cambio total de cobertura boscosa a cultivos y pastizales. Del mismo modo, en la India, Kundu *et al.* (2017) concluyen que el cambio de uso de la tierra hacia aumento de agricultura mostró incremento de la producción de agua (hasta 17.5 %) y disminución de la evapotranspiración real (hasta 8.4 %).

El aumento de la cobertura de bosque del 50 % (CUCT 2) en la subcuenca Quiscab presentó cambio en los flujos del balance en dirección contraria a los que se prevén para CUCT 1 (-80 % de bosque). La evapotranspiración real incrementó (+2 %) por ampliación del área foliar y, por defecto, aumentó la intercepción de la precipitación; esto provocó la reducción de la escorrentía superficial, flujo base y producción de agua en -2, -8 y -2 %, respectivamente.

En igual dirección de incremento de cobertura boscosa en la cuenca Aragón de España, Morán-Tejeda *et al.* (2015) estimaron reducción de escorrentía superficial anual en 7.4 %. De igual manera, en Ecuador, al incrementar el área de bosque se aumentó la evapotranspiración con la reducción de flujos rápidos (Crespo *et al.*, 2008). En China, Wei *et al.* (2016) evidenciaron el mayor incremento en escorrentía superficial y producción de agua ante un aumento de la cobertura forestal de 30.39 %.

La dinámica de erosión por cambio de cobertura en la subcuenca Quiscab es leve (+10 y -1 % para CUCT 1 y 2, respectivamente), considerando el alto cambio relativo de cobertura. Hallazgos similares al escenario CUCT 2 (+50 % bosque) muestran Phan, Wu y Hsieh (2011) en Vietnam, cuando el área de pastizales se convirtió en bosque, ya que la carga de sedimentos disminuyó 6.08 %. Del mismo modo, en Brasil, Blainski, Porras, Garbossa y Pinheiro (2017), en cuencas con reducción de superficie de pasto e incremento del bosque, se presentó disminución de la erosión de > 20 a $12.1-20 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Además, Li, Zhang y Peng (2015) plantean que el bosque y pastizales tienen similar efecto de reducción de erosión, pues ambos usos manifiestan similar capacidad de infiltración que reduce la fuerza erosiva de la lluvia (Nunes, De-Almeida, & Coelho, 2011). Aunque la cobertura boscosa es más efectiva, si la cubierta herbácea es densa puede llegar a tener similar eficiencia (Morgan, 1997). La dinámica de erosión y sedimentos puede ser más sensible al plantear cambios de cobertura de

bosque o pastos hacia agricultura (Alibuyog *et al.*, 2009; Da-Silva, Silva, & Souza, 2016; Huang & Lo, 2015), ya que las tierras de cultivo son más propensas a erosión que el bosque y se acelera el movimiento del suelo, sobre todo en lugares de relieve pronunciado (Bakker *et al.*, 2008; Brooks, Ffolliott, & Magner, 2012).

Conclusiones

Con datos observados limitados —temporal y espacialmente— se simuló el ciclo hidrológico y erosión hídrica, donde un punto de calibración fue satisfactorio (río Pamán), y otro no satisfactorio (río Quiscab), que se diferencian por la intervención del territorio. Resalta la importancia del monitoreo hidrológico, y conocer la dinámica de uso y gestión del agua para lograr mejores ajustes hidrológicos en zonas de alta intervención, e incrementar el uso potencial de la modelación hidrológica como herramienta de planificación.

Ante el escenario de cambio climático RCP 8.5 del modelo HadGEM2-ES al año 2050, se prevé reducción severa generalizada de los

componentes del balance hídrico y producción de agua a escala anual y mensual, con cambios de leves a severos en la variabilidad del régimen hidrológico anual. Se espera reducción de moderada a severa de recarga a los acuíferos; de manera similar, la erosión hídrica se reducirá mensual y anualmente, y su variabilidad anual disminuirá severamente.

Debido al cambio de cobertura, cada año se incrementarán los flujos del balance hídrico (con excepción de la evapotranspiración actual, flujo lateral y recarga hídrica), producción de agua, escorrentía superficial, flujo base y erosión hídrica ante el escenario de reducción del 80 % de bosque. Opuestamente, ante el escenario +50 % de bosque, dichos componentes disminuirán y la evapotranspiración real se incrementará. Cambios muy leves a moderados se esperan en la variabilidad del régimen hidrológico anual y de erosión hídrica para ambos escenarios.

Es mayor la sensibilidad de los componentes del balance hidrológico y erosión hídrica ante el escenario de cambio climático que los escenarios hipotéticos de cambio de uso/cobertura de la tierra. Ante cambio climático se pronostican mayores cambios a escala mensual y anual, y de variabilidad del régimen anual.

Los cambios en erosión hídrica estimados en los escenarios de cambio de cobertura se determinan de leves a moderados, dado el alto cambio relativo de superficie de transición. Las coberturas involucradas en la dinámica (bosque, pastizales y matorrales) son responsables de las menores tasas de erosión anual en comparación con la agricultura anual.

En la subcuenca Quiscab, el uso/cobertura bosque (conífera, latifoliado y mixto) no garantiza producción de agua; no obstante, su presencia muestra la regulación de flujos del balance hidrológico y erosión hídrica.

Agradecimientos

Esta publicación fue posible gracias al apoyo de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID) bajo los términos del Acuerdo Cooperativo No. AID 596-A-13-00002 (Programa de Cambio Climático Regional de USAID), ejecutado por el CATIE, IUCN, CARE International y TerraGlobal Capital LLC. Los contenidos y opiniones expresadas aquí no son responsabilidad del Programa Regional de Cambio Climático y no reflejan necesariamente las opiniones de USAID, del Gobierno de los Estados Unidos o de los implementadores del Programa.

Referencias

- Abbaspour, K. C. (2015). *SWAT-CUP: SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual*. Dübendorf, Switzerland: Swiss Federal Instituto of Aquatic Science and Technology.
- Abbaspour, K., Johnson, C., & Van Genuchten, M. T. (2004). Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential

uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone Journal*, 3(4), 1340-1352.

Abbaspour, K., Rouholahnejad, E., Vaghefi, S., Srinivasan, R., Yang, H., & 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.

Abbaspour, K. C., Yang, J., Maximov, I., Siber, R., Bogner, K., Mieleitner, J.,..., & Srinivasan, R. (2007). Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *Journal of Hydrology*, 333(2), 413-430.

Alibuyog, N., Ella, V., Reyes, M. R., Srinivasan, R., Heatwole, C., & Dillaha, T. (2009). Predicting the effects of land use change on runoff and sediment yield in Manupali River subwatersheds using the SWAT model. *International Agricultural Engineering Journal*, 18(1), 15.

Amador, J., Hidalgo, H., Alfaro, E., Durán-Quesada, A., & Calderón, B. (2016). Regional climate: Central America and the Caribbean. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(8), S178-S181.

Arnell, N. W. (2004). Climate change and global water resources: SRES emissions and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, 14(1), 31-52.

Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., Van Griensven, A., & Van

- Liew, M. W. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 55(4), 1491-1508.
- Arnold, J., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89.
- Awotwi, A., Kumi, M., Jansson, P., Yeboah, F., & Nti, I. (2015). Predicting hydrological response to climate change in the White Volta catchment, West Africa. *Journal of Earth Science & Climatic Change*, 6(1), 1.
- Bakker, M. M., Govers, G., van Doorn, A., Quetier, F., Chouvardas, D., & Rounsevell, M. (2008). The response of soil erosion and sediment export to land-use change in four areas of Europe: The importance of landscape pattern. *Geomorphology*, 98(3), 213-226.
- Blainski, É., Porras, E. A. A., Garbossa, L. H. P., & Pinheiro, A. (2017). Simulation of land use scenarios in the Camboriú River Basin using the SWAT model. *RBRH*, 22(33), 1-12. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011716110>
- Bouroncle, C., Imbach, P., Rodríguez-Sánchez, B., Medellín, C., Martínez-Valle, A., & Läderach, P. (2016). Mapping climate change adaptive capacity and vulnerability of smallholder agricultural livelihoods in Central America: Ranking and descriptive approaches to support

adaptation strategies. *Climatic Change*, 1-15.
DOI:10.1007/s10584-016-1792-0

Brooks, K. N., Ffolliott, P. F., & Magner, J. A. (2012). *Hydrology and the management of watersheds*. 4 ed. New Delhi, India: John Wiley & Sons.

Brutsaert, W. (2005). *Hydrology: An introduction*. New York, USA: Cambridge University Press.

Cao, W., Bowden, W. B., Davie, T., & Fenemor, A. (2006). Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability. *Hydrological Processes*, 20(5), 1057-1073.

Carpenter, S. R., Mooney, H. A., Agard, J., Capistrano, D., DeFries, R. S., Díaz, S.,..., & Pereira, H. M. (2009). Science for managing ecosystem services: Beyond the Millennium Ecosystem Assessment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(5), 1305-1312.

Chen, Y., Ale, S., Rajan, N., Morgan, C. L., & Park, J. (2015). Hydrological responses of land use change from cotton (*Gossypium hirsutum* L.) to cellulosic bioenergy crops in the Southern High Plains of Texas, USA. *Global Change Biology Bioenergy*, 8(5), 981-999.

Chien, H., Yeh, P. J.-F., & Knouft, J. H. (2013). Modeling the potential impacts of climate change on streamflow in agricultural watersheds of the Midwestern United States. *Journal of Hydrology*, 491, 73-88.

- Chow, V. T. (1994). *Hidráulica de canales abiertos*. Saldarriaga, J. (trad.). Santa Fé de Bogotá, Colombia: McGraw-Hill Interamericana.
- Cogo, N., Moldenhauer, W., & Foster, G. (1984). Soil loss reductions from conservation tillage practices. *Soil Science Society of America Journal*, 48(2), 368-373.
- Collins, M., Knutti, R., Arblaster, J., Dufresne, J.-L., Fichefet, T., Friedlingstein, P.,..., & Krinner, G. (2013). Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility. In: Stocker, T., Qin, D., Plattner, G., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., Nauels, A. Xia, Y., Bex, B., & Midgley, B. (eds.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1029-1136). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Collins, W., Bellouin, N., Doutriaux-Boucher, M., Gedney, N., Halloran, P., Hinton, T.,..., & Liddicoat, S. (2011). Development and evaluation of an Earth-system model–HadGEM2. *Geoscientific Model Development*, 4(4), 1051-1075.
- CONAP, Consejo Nacional de Áreas Protegidas. (2007). *Plan maestro de la reserva de uso múltiple del lago de Atitlán 2007-2011*. Guatemala, Guatemala: Consejo Nacional de Áreas Protegidas.
- Crespo, P., Coello, C., Iñiguez, V., Cisneros, P., Ramírez, M., & Feyen, J. (2008). *Evaluación de SWAT 2000 como herramienta para el análisis de escenarios de cambio de uso del suelo en microcuencas*

de montaña del sur del Ecuador. XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Quito, Ecuador.

- Cronshey, R. (1986). *Urban hydrology for small watersheds, Technical Release 55*. Washington, DC, USA: United States Department of Agriculture.
- Cubasch, U., Wuebbles, D., Chen, D., Facchini, M., Frame, D., Mahowald, N., & Winther, J. (2013). Introduction. In: Stocker, T., Qin, D., Plattner, G., Tignor, M., Allen, S., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, B., & Midgley, B. (eds.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 119-158). Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Da-Silva, V. D. P., Silva, M. T., & Souza, E. P. D. (2016). Influence of land use change on sediment yield: a case study of the sub-middle of Sao Francisco River Basin. *Journal of the Brazilian Association of Agricultural Engineering*, 36(6), 1005-1015.
- Davie, T. (2008). *Fundamentals of hydrology*. Abingdon, UK: Taylor & Francis.
- Dix, M., Fortin, I., & Medinilla, O. (2003). *Diagnóstico ecológico-social y plan preliminar de conservación del área de Atitlán*. Guatemala, Guatemala: Universidad del Valle de Guatemala/The Nature Conservancy.

- Engman, E. T. (1986). Roughness coefficients for routing surface runoff. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 112(1), 39-53.
- Esri Inc. (2014). *ArcGIS Desktop: Release 10.2*. Redlands, USA: Environmental Systems Research.
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Vargas-Rojas, R., Arias- Jiménez, A., Straaten, P. V., Lavelle, P., Zonn, S., Ibish, P., Buol, S., Graham, R., McDaniel, P. R. C., & Vessel, A. (eds.). Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- FAO, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. (1980). *Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos*. Roma, Italia: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Fetter, C. W. (2000). *Applied hydrogeology*. New Jersey, USA: Prentice-Hall.
- Fitts, C. R. (2012). *Groundwater science* (2nd ed.). Maine, USA: Elsevier.
- FFTC, Food and Fertilizer Technology Center for Asian and Pacific Region. (1995). *Soil conservation handbook*. Taipei, Taiwan Republic of China: Food and Fertilizer Technology Center for Asian and Pacific Region.

- Fullen, M. A., Guerra, A. J., Jorge, M. D. C. O., & Alexandre, S. T. (2014). Soil erosion and conservation in Brazil. *Anuário do Instituto de Geociências*, 37(1), 81-91. DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2014_1_81_91
- Gassman, P. W., Reyes, M. R., Green, C. H., & Arnold, J. G. (2007). The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(4), 1211-1250. DOI: 10.13031/2013.23637
- GIMBUT, Grupo Interinstitucional de Monitoreo de Bosques y Uso de la Tierra (cartógrafo). (2014). *Mapa de bosques y uso de la tierra 2012 (mapa digital)*. Guatemala, Guatemala: Grupo Interinstitucional de Monitoreo de Bosques y Uso de la Tierra.
- Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., & Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of Hydrology*, 377(1), 80-91.
- Han, D. (2010). *Concise hydrology*. Copenhagen, Denmark: Dawei Han & Ventus Publishing ApS.
- Hansen, J., Sato, M., Ruedy, R., Schmidt, G. A., & Lo, K. (2016). *Global temperature in 2015 (Blog spot)*. Recuperado de <http://csas.ei.columbia.edu/2016/01/19/global-temperature-in-2015/>

- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from ambient air temperature. En *American Society of Agricultural Engineers*. Artículo presentado para Winter Meeting American Society of Agricultural Engineers, USA.
- Hernandez, B., Flores, A., Garcia, B., Clemente, A., Morán, M., Cherrington, E.,..., & Guardia, J. M. (2011). Satellite monitoring of lake Atitlan in Guatemala. In: Tarté, A., Soto, E., & Messina, E. (eds.). *Second International Symposium on Building knowledge bridges for a sustainable water future* (pp. 234). Panamá, República de Panamá: Panama Canal Authority (ACP) and UNESCO.
- Hernández-Moreno, M. A., Álvarez-Nuñez, L., Girón, L., & Gutiérrez-López, R. (2011). *Estudio hidrológico-hidráulico de avenida en el río San Francisco (Panajachel, Guatemala)*. Sololá, Guatemala: Geólogos del Mundo.
- Horton, R. E. (1932). Drainage-basin characteristics. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 13(1), 350-361.
- Huang, T. C., & Lo, K. F. A. (2015). Effects of land use change on sediment and water yields in Yang Ming Shan National Park, Taiwan. *Environments*, 2(1), 32-42.
- Imbach, P., Molina, L., Locatelli, B., & Corrales, L. (2010). Vulnerabilidad de los servicios ecosistémicos hidrológicos al cambio climático en Mesoamérica. En: Martínez-Alonso, C., Locatelli, B., Vignola, R., & Imbach, P. (eds.). *Adaptación al cambio climático y servicios ecosistémicos en América Latina: libro de actas del seminario*

internacional SIASSE 2008 (pp. 32-43) (Serie técnica No. 99).
Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación
y Enseñanza.

IARNA-URL, Instituto de Agricultura Recursos Naturales y Ambiente de la
Universidad Rafael Landívar. (2013). *Evaluación regional de los
recursos hídricos y las necesidades de gestión para apoyar la
agricultura de pequeños productores: enfoque de gestión y
adaptación a las amenazas inducidas por el cambio y la variabilidad
climática en el altiplano occidental de Guatemala* (Vol. 67).
Guatemala, Guatemala: Instituto de Agricultura, Recursos
Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar.

INAB & CONAP, Instituto Nacional de Bosques & Consejo Nacional de
Áreas Protegidas (cartógrafo). (2015). *Mapa forestal por tipo y
subtipo de bosque, 2012 (mapa digital)*. Guatemala, Guatemala:
Instituto Nacional de Bosques & Consejo Nacional de Áreas
Protegidas.

INSIVUMEH, Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología
e Hidrología. (2016). *Estación El Tablón: serie histórica (1994 a
2015) de variables meteorológicas* (conjunto de datos). Guatemala,
Guatemala: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología,
Meteorología e Hidrología.

Jin, K., Cornelis, W. M., Gabriels, D., Schiettecatte, W., De-Neve, S., Lu,
J.,..., & Jin, J. (2008). Soil management effects on runoff and soil
loss from field rainfall simulation. *Catena*, 75(2), 191-199.

- Jin, X., & Sridhar, V. (2012). Impacts of climate change on hydrology and water resources in the boise and spokane river basins. *Civil Engineering Faculty Publications and Presentations*, 4(1), 1-31.
- Jones, C., Hughes, J., Bellouin, N., Hardiman, S., Jones, G., Knight, J.,..., & Bell, C. (2011). The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. *Geoscientific Model Development*, 4(3), 543-570.
- Jones, P. G., & Thornton, P. K. (2013). Generating downscaled weather data from a suite of climate models for agricultural modelling applications. *Agricultural Systems*, 114, 1-5.
- Jordán, A., Zavala, L. M., & Gil, J. (2010). Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. *Catena*, 81(1), 77-85.
- Khoi, D. N., & Suetsugi, T. (2013). Assessment of climate change impacts on hydrology and sediment yield in the BE river catchment, Vietnam. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Serie B1 (Hydraulic Engineering)*, 69(4), 31-36.
- Koch, M., & Cherie, N. (2013). SWAT modeling of the impact of future climate change on the hydrology and the water resources in the upper Blue Nile river basin, Ethiopia. *Proceedings of the 6th International Conference on Water Resources and Environment Research (ICWRER)* (pp. 488-523). DOI: 10.5675/ICWRER_2013

- Komárek, J., Zapomělová, E., Šmarda, J., Kopecký, J., Rejmánková, E., Woodhouse, J.,..., & Komárková, J. (2013). Polyphasic evaluation of *Limnographis robusta*, a water-bloom forming cyanobacterium from Lake Atitlán, Guatemala, with a description of *Limnographis gen. nov. Fottea*, 13(1), 39-52.
- Kundu, S., Khare, D., & Mondal, A. (2017). Past, present and future land use changes and their impact on water balance. *Journal of Environmental Management*, 197, 582-596. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.018>
- Li, Y., Zhang, S., & Peng, Y. (2015). Soil erosion and its relationship to the spatial distribution of land use patterns in the Lancang River Watershed, Yunnan Province, China. *Agricultural Sciences*, 6(8), 823.
- Locatelli, B. (2014). *Sinergias de adaptación-mitigación*. Bogor, Indonesia: Center for International Forestry Research (CIFOR).
- Marcinkowski, P., Piniewski, M., Kardel, I., Giełczewski, M., & Okruszko, T. (2013). Modelling of discharge, nitrate and phosphate loads from the Reda catchment to the Puck Lagoon using SWAT. *Annals of Warsaw University of Life Sciences-SGGW. Land Reclamation*, 45(2), 125-141.
- Martin, G., Bellouin, N., Collins, W., Culverwell, I., Halloran, P., Hardiman, S.,..., & Wiltshire, A. (2011). The HadGEM2 family of met office unified model climate configurations. *Geoscientific Model Development*, 4(3), 723-757.

- McNaughton, K., & Jarvis, P. (1983). Predicting effects of vegetation changes on transpiration and evaporation. In: Kozlowski, T. (ed.). *Water deficits and plant growth* (pp. 1-47). London, UK: Academic Press, INC.
- Me, W., Abell, J., & Hamilton, D. (2015). Effects of hydrologic conditions on SWAT model performance and parameter sensitivity for a small, mixed land use catchment in New Zealand. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(10), 4127-4147.
- MEA, Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: Health synthesis: A report of the Millennium Ecosystem Assessment* (vol. 5). Washington, USA: Board of Review Editors.
- Meinshausen, M., Smith, S. J., Calvin, K., Daniel, J. S., Kainuma, M., Lamarque, J.,..., & Riahi, K. (2011). The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. *Climatic Change*, 109(1-2), 213-241.
- MAGA, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (cartógrafo). (2010). *Modelo de elevación digital escala 1:50,000 (mapa digital)*. Guatemala, Guatemala: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.
- MAGA-DIGEGR, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación; Dirección de Información Geográfica Estratégica y Gestión de Riesgo. (2013). *Estudio Semidetallado de suelos del departamento de Sololá, Guatemala* (vol. 1). Guatemala, Guatemala: Ministerio

de Agricultura, Ganadería y Alimentación; Dirección de Información Geográfica Estratégica y Gestión de Riesgo.

MAGA-DIGEGR, Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, Dirección de Información Geográfica Estratégica y Gestión de Riesgo (cartógrafo). (2015). *Mapa de cobertura vegetal y uso de la tierra República de Guatemala, año 2010 (mapa digital)*. Guatemala, Guatemala: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, Dirección de Información Geográfica Estratégica y Gestión de Riesgo.

Morán-Tejeda, E., Zabalza, J., Rahman, K., Gago-Silva, A., López-Moreno, J. I., Vicente-Serrano, S.,..., & Beniston, M. (2015). Hydrological impacts of climate and land-use changes in a mountain watershed: Uncertainty estimation based on model comparison. *Ecohydrology*, 8(8), 1396-1416.

Morgan, R. P. C. (1997). *Erosión y conservación del suelo*. Terrón, P. U., & López-de-Meneses, J. D. M. (eds.) (2a ed.). Madrid, España: Mundi-Prensa.

Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900.

Nearing, M., Pruski, F., & O'neal, M. (2004). Expected climate change impacts on soil erosion rates: A review. *Journal of Soil and Water Conservation*, 59(1), 43-50.

- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., Williams, J., & King, K. (2005). *Soil and water assessment tool theoretical documentation*. Texas, USA: Agricultural Research Service.
- Newhall, C. G. (1987). Geology of the lake Atitlan region, western Guatemala. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 33(1-3), 23-55.
- Nunes, A. N., De-Almeida, A. C., & Coelho, C. O. (2011). Impacts of land use and cover type on runoff and soil erosion in a marginal area of Portugal. *Applied Geography*, 31(2), 687-699.
- Oglesby, R., & Rowe, C. (2014). *Impactos climáticos para Guatemala: resultados preliminares de los modelos climáticos regionales y globales IPCC AR5*. Guatemala, Guatemala: Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales.
- Pandey, B. K., Gosain, A., Paul, G., & Khare, D. (2016). Climate change impact assessment on hydrology of a small watershed using semi-distributed model. *Applied Water Science*, 7(4), 2029-2041. DOI: 10.1007/s13201-016-0383-6
- Phan, D., Wu, C., & Hsieh, S. (2011). Land use change effects on discharge and sediment yield of Song Cau catchment in Northern Vietnam. In *2010 International SWAT Conference* (350-361). Seul, Korea: Nam-Won Kim & Raghavan Srinivasan.
- Pineda, P. (2009). *Conflictos del uso del territorio y deterioro de las tierras. Perfil Ambiental 2008-2009: las señales ambientales críticas*

- y su relación con el Desarrollo* (pp. 49-64). Serie Perfil Ambiental No. 11. Guatemala, Guatemala: Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar.
- Qi, S., Sun, G., Wang, Y., McNulty, S., & Myers, J. M. (2009). Streamflow response to climate and landuse changes in a coastal watershed in North Carolina. *Transactions of the ASABE*, 52(3), 739-749.
- Refsgaard, J. C., & Storm, B. (1996). Construction, calibration and validation of hydrological models. In: Abbott, M.B. & Refsgaard, J.C. (eds.). *Distributed hydrological modelling* (pp. 41-54). Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Rejmánková, E., Komárek, J., Dix, M., Komárková, J., & Girón, N. (2011). Cyanobacterial blooms in Lake Atitlan, Guatemala. *Limnological Ecology and Management of Inland Waters*, 41(4), 296-302.
- Revenga, C., Brunner, J., Henninger, N., Kassem, K., & Payne, N. (2000). *Pilot analysis of global ecosystem*. Washington, DC, USA: World Resources Institute.
- Ripl, W. (2003). Water: The bloodstream of the biosphere. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 358(1440), 1921-1934.
- Rostamian, R., Jaleh, A., Afyuni, M., Mousavi, S. F., Heidarpour, M., Jalalian, A., & Abbaspour, K. C. (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.
- Santhi, C., Kannan, N., Arnold, J., & Di-Luzio, M. (2008). Spatial calibration and temporal validation of flow for regional scale hydrologic modeling. *Journal of the American Water Resources Association*, 44(4), 829-46.
- Saxton, K., & Rawls, W. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil science Society of America Journal*, 70(5), 1569-1578.
- Singh, V., Bankar, N., Salunkhe, S. S., Bera, A. K., & Sharma, J. (2013). Hydrological stream flow modelling on Tungabhadra catchment: Parameterization and uncertainty analysis using SWAT CUP. *Current Science(Bangalore)*, 104(9), 1187-1199.
- Stehr, A., Debels, P., Arumi, J. L., Alcayaga, H., & Romero, F. (2010). Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático: experiencias de dos cuencas de la zona centro-sur de Chile. *Tecnología y ciencias del agua*, 1(4), 37-58.
- Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Alexander, L. V., Allen, S. K., Bindoff, N. L., ..., & Xie, S.-P. (2013). *Technical summary*. Cambridge, UK, and New York, USA: Cambridge University Press.
- Strahler, A. N. (1957). Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913-920.

- Takken, I., Beuselinck, L., Nachtergaele, J., Govers, G., Poesen, J., & Degraer, G. (1999). Spatial evaluation of a physically-based distributed erosion model (LISEM). *Catena*, 37(3), 431-447.
- Thai, T. H., Thao, N. P., & Dieu, B. T. (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.
- UPGGR-MAGA, Unidad de Planificación Geográfica y Gestión de Riesgo del Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. (2009). *Mapa de Clasificación Climática de la República de Guatemala, a escala 1:50,000; adaptado del Sistema Thornthwaite (Memoria técnica)*. Guatemala, Guatemala: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación.
- URL-UNR-UVG-DRI-UCD, Universidad Rafael Landivar, University of Nevada Reno, Universidad del Valle, Desert Research Institute, The University of California DAVIS. (2014). *Estado del Lago Atitlán. Informe 2014*. Sololá, Guatemala: Unidos por El Lago Atitlán.
- Vörösmarty, C., Léveque, C., Revenga, C., Bos, R., Caudill, C., Chilton, J.,..., & Prager, D. (2005). Fresh water. In: M. H. Rashid, R. Scholes, & A. Neville (eds.). *Ecosystems and Human Well-Being: Current State and Trends: Findings of the Condition and Trends Working Group of the Millennium Ecosystem Assessment* (pp. 165-207). Washington, DC, USA: Island Press.

- Wei, C., Chen, J., Song, X., Yao, Z., Kou, C., & Zhang, X. (2016). Effects of land use change on runoff in Qiaoyu river basin. *Journal of Residuals Science & Technology*, 13(6). DOI: 10.12783/issn.1544-8053/13/6/117.
- Williams, J. (1975a). Sediment-yield prediction with universal equation using Runoff energy factor. In: ARS-USDA (ed.). *Present and prospective technology for predicting sediment yields and sources*. (pp. 244-252). Mississippi, USA: Agricultural Research Service-US Department o Agriculture.
- Williams, J. (1975b). Sediment routing for agricultural watersheds. *American Water Resources Association*, 11(5), 965-974.
- Winchell, M., Srinivasan, R., Di-Luzio, M., & Arnold, J. (2013). *ArcSWAT interface for SWAT2012: User's guide*. Temple, USA: USDA-ARS.
- WMO, World Meteorological Association. (2016). *WMO Statement on the Status of the Global Climate in 2015*. Geneva, Switzerland: World Meteorological Association.
- Xicay, O. (2011). *Análisis del impacto del cambio de uso de la tierra en el comportamiento del ciclo hidrológico de la subcuenca del río Quiscab, Sololá* (tesis), Facultad de Agronomía, Universidad de San Carlos, Guatemala.
- Yu, X., Xie, X., & Meng, S. (2017). Modeling the responses of water and sediment discharge to climate change in the upper Yellow river basin, China. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(12), 1-10.

- Zhang, Z. (2014). Nonpoint source and water quality modeling. In: Eslamian, S. (ed.). *Handbook of engineering hydrology: Environmental hydrology and water management* (pp. 261-298). Florida, USA: CRC Press.
- Zhang, L., Nan, Z., Xu, Y., & Li, S. (2016). Hydrological impacts of land use change and climate variability in the headwater region of the Heihe river basin, Northwest China. *PloS One*, 11(6), e0158394.
- Zhang, X., Srinivasan, R., & Van Liew, M. (2008). Multi-site calibration of the SWAT model for hydrologic modeling. *Transactions of the ASABE*, 51(6), 2039-2049.
- 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.
- Zhang, L., Dawes, W., & Walker, G. (2001). Response of mean annual evapotranspiration to vegetation changes at catchment scale. *Water Resources Research*, 37(3), 701-708.
- Zhang, L., Walker, G. R., & Dawes, W. (1999). *Predicting the effect of vegetation changes on catchment average water balance*. Canberra, Australia: Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology.