

Revisión de la aplicación del modelo *SWAT* para la gestión sustentable de los recursos hídricos ante un panorama de sobreexplotación de acuíferos, cambio climático y cambio en el uso de suelo

Review of the application of SWAT Model for the sustainable management of water resources against a background of aquifers overexploitation, climate change and land use change

José Arturo Espinoza-Bonilla¹, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7689-5544>

Alejandro Fidel Flamenco-Sandoval², ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7700-8591>

Xitlali Virginia Delgado-Galván³, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7283-0239>

Daniel Tagle-Zamora⁴, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6203-7429>

¹Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México, ja.espinozabonilla@ugto.mx

²Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México, flamenco@ugto.mx



³Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, Guanajuato, México, xdelgado@ugto.mx

⁴Departamento de Estudios Sociales, División de Ciencias Sociales y Humanidades, Campus León, Universidad de Guanajuato, León, México, datagle@ugto.mx

Autor para correspondencia: José Arturo Espinoza-Bonilla, arturoesbon@gmail.com

Resumen

Con el propósito de demostrar la capacidad del modelo *SWAT* (acrónimo de *Soil & Water Assessment Tool*) para llevar a cabo estudios de viabilidad destinados a la implementación de alternativas sustentables y a pequeña escala para mitigar la sobreexplotación de aguas subterráneas bajo la amenaza del cambio climático y cambio en el uso de suelo, en este artículo se han recopilado y analizado distintas investigaciones en las que se ha empleado tal herramienta para el análisis y la predicción de la dinámica de aguas superficiales y subterráneas, la erosión y sedimentación del suelo, así como estudios que incorporan la implementación de embalses, humedales y mejores métodos de gestión (BMP, por sus siglas en inglés) con objetivos hidrológicos y de conservación de suelos. Entre los resultados se identifica un número limitado de trabajos encaminados exclusivamente a determinar la viabilidad de implementar pequeñas obras de recarga hídrica. Asimismo, se observa en la mayoría de las metodologías propuestas la simulación de un escenario base previamente calibrado y validado, el cual después es modificado para simular

escenarios de cambio climático, cambio en el uso de suelo, o implementación de BMP. Por último, a partir del análisis de los resultados de las distintas investigaciones se ha identificado una alta efectividad de la reforestación, terrazas paralelas, "barraginhas", presas filtrantes y las terrazas en general para reducir la producción de sedimentos y la escorrentía superficial en una cuenca, lo cual puede eventualmente favorecer la recarga hídrica.

Palabras clave: modelo matemático, recursos hídricos, agua subterránea, conservación del suelo, erosión del suelo, uso de la tierra.

Abstract

With the purpose of demonstrating the capability of the SWAT model (Soil & Water Assessment Tool) to conduct feasibility studies for the implementation of sustainable and small-scale alternatives to mitigate the overexploitation of groundwater under the threat of climate change and land use change, this article has compiled and analyzed various research studies in which this tool has been used for the analysis and prediction of the dynamics of surface and groundwater, soil erosion and sedimentation, as well as studies that incorporate the implementation of reservoirs, wetlands, and Best Management Practices (BMPs) with hydrological and soil conservation objectives. Among the results, a limited number of works exclusively aimed at determining the feasibility of implementing small-scale water recharge structures has been identified. Furthermore, most of the proposed methodologies observe the simulation of a base scenario previously calibrated and validated, which is later modified to simulate scenarios of climate change, land use change, or BMP implementation. Finally, from the analysis of the results of the different studies, a high effectiveness of reforestation, parallel terraces,

"barraginhas," filter dams, and terraces in general have been identified in reducing sediment production and surface runoff in a watershed, which can eventually favor water recharge.

Keywords: Mathematical models, water resources, groundwater, soil conservation, soil erosion, land use.

Recibido: 24/06/2024

Aceptado: 14/06/2025

Publicado *ahead of print*: 25/06/2025

Versión final: 01/03/2026

Introducción

Resulta un hecho indiscutible que la gestión del agua está enfrentando a nivel mundial cada vez mayores desafíos, atribuidos en gran medida a la creciente incertidumbre derivada del cambio climático, cambios socioeconómicos (Pahl-Wostl, 2007), crecimiento poblacional, cambios tecnológicos, instituciones político-económicas, y cambios en las actitudes y comportamientos de las sociedades (Morales, 2012). Afín a esta problemática se ha identificado que desde fines del siglo pasado la disponibilidad de agua dulce se ha visto alterada fundamentalmente por la variabilidad en los ciclos climáticos y por el uso intensivo del recurso con fines diversos, dando como consecuencia un agravamiento de los conflictos por acceder a ella (Langhoff, Gerald, & Rosell, 2017). En el caso del cambio climático, si bien sus efectos están presentes en diferentes dimensiones (Nieto, 2011), los cambios en la precipitación y en su distribución espacio-temporal a causa del aumento en la temperatura a

nivel global han comenzado a afectar sensiblemente el comportamiento del ciclo hidrológico (Quiroz, 2020), con consecuencias directas no solo en la disponibilidad actual de agua potable sino también en la sustentabilidad futura del recurso, siendo temas de atención prioritaria, dada su relevancia para el sustento de la vida y los ecosistemas.

En México, estos cambios en la demanda de agua, así como los cambios en los ciclos climáticos han orillado a una importante sobreexplotación de los cuerpos de agua subterránea; fuente principal de agua para el país de acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (Conagua) (Conagua, 2019), que representa el 56.7 % del volumen total entregado a través de redes de agua potable. Según datos proporcionados por la misma Conagua (2022), de los 653 acuíferos de México, el número de ellos con un déficit hídrico había oscilado anualmente entre 100 y 115 hasta el año 2019, existiendo estados en una situación extrema, como el caso de Guanajuato, donde 19 de sus 20 acuíferos se encuentran en condición de sobreexplotación (González, 2023). Con la finalidad de brindar soluciones sustentables para hacer frente a este y demás problemas afines a la gestión de los recursos hídricos es que surge la gestión adaptativa del agua (AWM, por sus siglas en inglés), como extensión esencial y oportuna del enfoque de gestión integral de los recursos hídricos (IWRM, por sus siglas en inglés) (Pahl-Wostl & Sendzimir, 2005). Bajo este nuevo paradigma de gestión se proponen tanto modificaciones en los marcos regulatorios a través del proceso de aprendizaje como modificaciones en la infraestructura destinada a la gestión del propio recurso hídrico (Huntjens *et al.*, 2011); infraestructura que se basa principalmente en modelos de cogestión social que incluyen soluciones alternativas descentralizadas y a pequeña escala como ecotecnias, cosecha de lluvia, reducción de pérdidas físicas en redes de

distribución, modernización de la agricultura (riego e inundación controlada), gestión de recarga de acuíferos (obras de intercepción e infiltración), obras de conservación de suelos, sistemas de tratamiento de agua y gestión de la demanda.

Distintos usuarios han comenzado a mostrar interés en este tipo de soluciones para hacer frente a los problemas de gestión hídrica presente en sus ciudades y comunidades; tal es el caso, por ejemplo, de la ciudad de León y Guadalajara, cuyos usuarios del agua, en conjunto con grupos de académicos y expertos, han propuesto la implementación de alternativas como la cosecha de agua de lluvia para compensar el volumen de agua que ya no aportaría la presa El Zapotillo. Sin embargo, opositores o escépticos a estas alternativas han declarado que se trata de medidas muy abstractas y poco fiables; mientras que otros, si bien la consideran una buena alternativa, han manifestado la incapacidad para estimar su potencial o desarrollar un plan cohesivo para emprenderlo (Godínez, 2022). Aunado a esto, incertidumbres asociadas con los procesos físicos subterráneos, la interacción entre el agua subterránea y superficial, la demanda futura de agua, o los efectos del cambio climático, han obstaculizado aún más la aceptación de estas alternativas por las autoridades y los tomadores de decisiones (Godínez, 2022). Por ello es necesario y oportuno desarrollar estudios y análisis que disminuyan dichas incertidumbres.

Modelo SWAT

SWAT es el acrónimo para *Soil & Water Assessment Tool* (Herramienta para la Evaluación del Suelo y el Agua), modelo a escala de cuenca desarrollado en la década de 1990 para el Servicio de Investigación Agrícola de EUA, con la finalidad de predecir el impacto de las prácticas de gestión del territorio sobre el agua, los sedimentos y los químicos agrícolas en grandes y complejas cuencas, con diferentes tipos y usos de suelo, así como condiciones de gestión para largos periodos de tiempo (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2009). De acuerdo con Uribe (2010), SWAT es un modelo continuo de tiempo, es decir un modelo conformado a largo plazo que no está diseñado para simular un único acontecimiento de flujo detallado y que como datos de entrada requiere información específica sobre el clima y tiempo, propiedades de suelos, topografía, vegetación y prácticas de uso de suelo que acontecen en las cuencas. Así, procesos físicos asociados con el movimiento del agua, movimiento de sedimento, desarrollo de cosecha, ciclo de nutrientes, etcétera, son modelados directamente por SWAT (Uribe, 2010).

Respecto al fundamento del modelo hidrológico de SWAT, este se divide en dos grandes componentes (Fernández, 2017): la fase terrestre del ciclo hidrológico, el cual se encarga de simular la cantidad de agua vertida al canal principal de la cuenca por cada subcuenca en la que se haya dividido la cuenca; y la fase de tránsito, responsable de modelizar el movimiento del agua a través de la red de canales hasta su desembocadura o sección de cierre de la cuenca. En cuanto a la modelización del módulo sedimentario, se dividirá en la fase erosiva y la fase de transporte (Fernández, 2017). De acuerdo con el mismo autor, para la primera se modeliza la producción de sedimentos mediante la

ecuación universal modificada de pérdida de suelo (MUSLE) (Williams, 1975); mientras que para la fase de transporte, el programa la divide en dos componentes: deposición y degradación, las cuales funcionan de manera simultánea, de tal forma que la cantidad de sedimentos finales que llegan a la sección de cierre de una cuenca se estima como la cantidad de sedimentos que llegan a los cauces de la cuenca menos la cantidad de sedimentos depositados en el cauce más la tasa de degradación del cauce.

Cabe señalar que para la modelización tanto hidrológica como sedimentaria de una cuenca con *SWAT*, se han identificado ciertos procesos fundamentales (Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams, 2005; Neitsch *et al.*, 2009; Uribe, 2010): delimitación de la cuenca y las subcuencas (*watershed delineator*); definición de las unidades de respuesta hidrológica (*HRU analysis*); incorporación de datos de climáticos (*write input tables*), edición de los datos de entrada del modelo (*edit SWAT input*), simulación y calibración del modelo. En la Figura 1 se muestra un diagrama del proceso de simulación con *SWAT*.

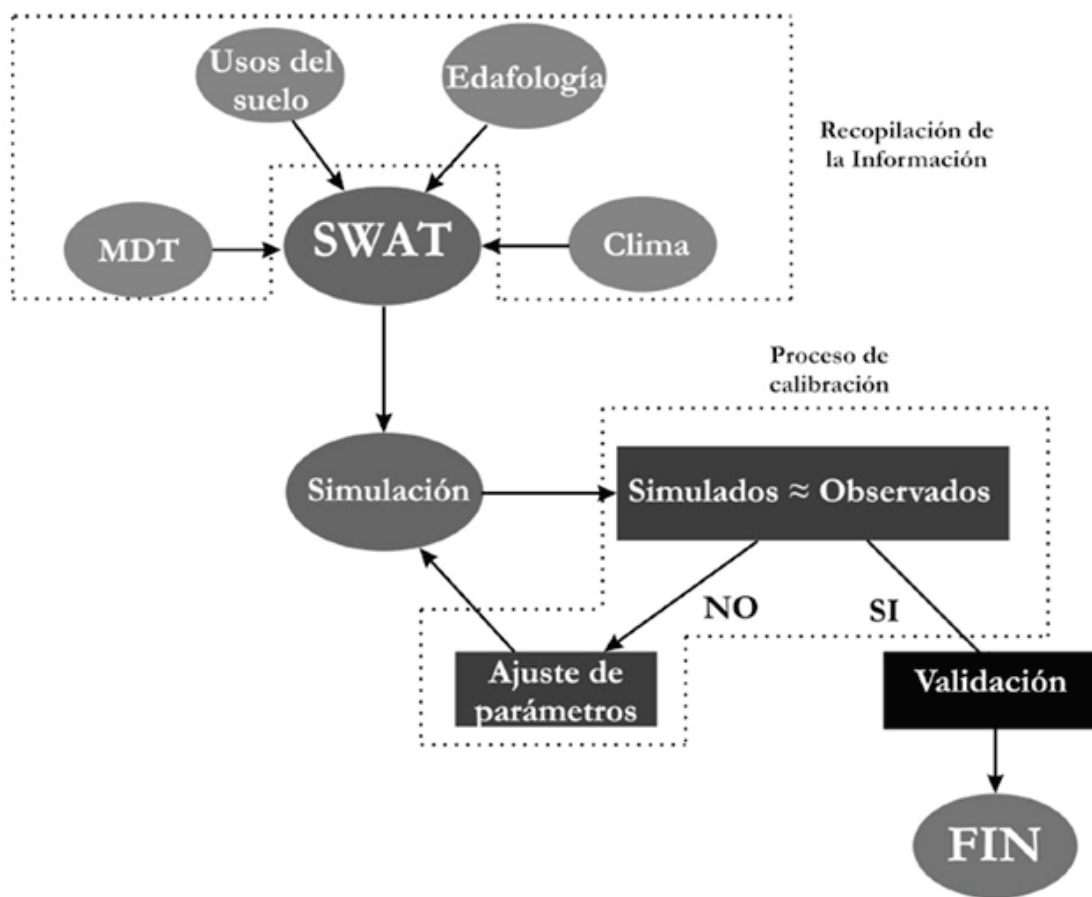


Figura 1. Proceso de modelización con *SWAT*. Figura recuperada de Galván (2011). Se conserva la ortografía original de la figura [sic].

En los últimos años se ha desarrollado un importante número de investigaciones que incluyen al modelo *SWAT*, ya sea sobre la aplicación del modelo o analizando sus componentes. Para dimensionar este auge en la aplicación del modelo, Aloui *et al.* (2023) mencionan que el 86 % de los estudios que incluyen al modelo *SWAT* se desarrollaron en la década pasada. En la literatura es posible encontrar extensas compilaciones que presentan estas investigaciones. Por ejemplo, Krysanova y White (2015) recopilan diez artículos publicados en la revista *Hydrological Sciences Journal*, con aplicación de *SWAT* en temas como

nutrientes y BMP, sedimentos y BMP, embalses y humedales, irrigación, cultivos bioenergéticos, impacto del cambio climático e impacto de cambio de uso de suelo. Asimismo, los autores describen otros artículos con aplicación de *SWAT* en temas como escorrentía superficial y sedimentos, contaminación difusa, agua superficial y subterránea, impacto del cambio climático y cambio en el uso de suelo, y aplicaciones de *SWAT* a gran escala.

Gassman, Reyes, Green y Arnold (2007) presentan más de 250 artículos identificados en la aplicación de *SWAT*, revisión de los componentes de *SWA* u otro tipo de investigación que incluya al modelo. Los autores resumieron los artículos de acuerdo con distintas categorías de aplicación, como calibración de caudal y análisis hidrológicos relacionados, impacto del cambio climático en la hidrología, análisis de carga contaminante, comparación con otros modelos, y técnicas de calibración y análisis de sensibilidad. Recientemente, Aloui *et al.* (2023) han identificado 260 artículos elaborados entre 2002 y 2022, que incluyen estudios con el modelo *SWAT* aplicados en cuencas del Mediterráneo. Entre los temas que abordan los artículos escogidos por los autores está la aplicación del *SWAT* para la gestión de los recursos hídricos, erosión del suelo y sedimentación, efectos del cambio de uso de suelo y cambio climático en la hidrología, BMP y riesgos ambientales.

Materiales y métodos

En el presente artículo se ha buscado identificar y exponer aquellas investigaciones enfocadas a la aplicación del modelo *SWAT* para evaluar la pertinencia de implementar acciones adaptativas de gestión sustentable del agua con el objetivo principal de disminuir el déficit hídrico

de cuerpos de agua subterráneos ante distintos escenarios de cambio climático y cambio en el uso de suelo. Bajo este contexto, y como delimitación temporal de los artículos dentro del planteamiento metodológico para el desarrollo de la revisión, se han considerado distintos estudios llevados a cabo sobre todo en el siglo XXI, abarcando desde 1999 hasta 2024. En cuanto a la delimitación espacial, no se ha restringido la revisión a una región geográfica específica, sino que se ha buscado incluir, en la medida de lo posible, investigaciones cuyas áreas de estudio presenten características físicas, meteorológicas e hidrológicas propias de climas desérticos y semidesérticos, predominantes en el territorio mexicano.

Durante el proceso de revisión se ha observado que la mayoría de los artículos analizados no abordan de manera específica o exclusiva la simulación de acciones adaptativas orientadas a la captación y recarga hídrica. Por esta razón, se ha procurado seleccionar y presentar también estudios descriptivos y de aplicación que guarden algún grado de relación con dicho objetivo. Es importante destacar que una parte significativa de los artículos estudiados forman parte de las revisiones compiladas por Gassman *et al.* (2007), Krysanova y White (2015), y Aloui *et al.* (2023). Además de estos trabajos de revisión, se han incluido otras investigaciones disponibles en la base de datos bibliográfica de *Web of Science* (WoS), con el propósito de identificar estudios que exploren la implementación de acciones adaptativas para mitigar la sobreexplotación de aguas subterráneas. Entre estas investigaciones se encuentran aplicaciones del modelo *SWAT* en el análisis y la predicción de la dinámica de aguas superficiales y subterráneas; la erosión y sedimentación del suelo, así como estudios relacionados con la implementación de embalses, humedales y prácticas de manejo de conservación (BMP, por sus siglas

en inglés) con objetivos hidrológicos y de conservación de suelos. En la mayoría de los casos se ha buscado que estos estudios incluyan la simulación de distintos escenarios de cambio climático y cambios en el uso del suelo, a fin de proporcionar una visión integral sobre la gestión sustentable del agua en contextos climáticos y ambientales específicos.

Resultados

Aplicaciones del modelo *SWAT* para la gestión sustentable del agua

Agua superficial y subterránea

En el trabajo de Chung *et al.* (2015), los autores emplearon el modelo *SWAT-MODFLOW* para examinar los cambios en los componentes hidrológicos bajo seis escenarios de extracción de agua subterránea en la cuenca Mihocheon en Corea del Sur. Haro, Palazón y Beguería (2020) presentan un enfoque basado en modelos y escenarios múltiples para evaluar cómo el cambio climático puede afectar en el futuro la hidrología y la gestión del agua en el sistema del río Ebro en España. Para ello desarrollaron un modelo hidrológico para la cabecera del sistema y luego utilizaron un modelo de gestión para simular la operación del reservorio de agua y la distribución de esta entre las diferentes unidades de demanda de agua del sistema. Finalmente evaluaron el desempeño y la sustentabilidad del sistema mediante indicadores basados en la frecuencia, duración y magnitud del déficit de abastecimiento. Milewski, Wondwosen, Elkadiri y Durham (2020) presentan una metodología integral que combina la teledetección satelital, el modelado hidrológico mediante *SWAT* y distintas proyecciones climáticas para evaluar el

impacto de los cambios climáticos y la acción antrópica en las aguas subterráneas y superficiales en el norte de Marruecos. Sus resultados sugieren que las interacciones humanas son la principal causa del agotamiento de las reservas de agua subterránea, haciendo necesario mejorar por lo tanto el entendimiento sobre la relación e impactos del cambio climático en los recursos hídricos.

Por su parte, Carvalho-Santos, Monteiro, Azevedo, Pradinho-Honrado y Nunes (2017) han simulado en *SWAT* distintos escenarios futuros con cambios en la temperatura y la precipitación en el noreste de Portugal, identificando que las soluciones propuestas para el abastecimiento de agua tomando en cuenta solo las condiciones climáticas actuales serán insuficientes para la gestión del recurso en un futuro. Relativo a lo anterior, Sun y Cornish (2005) utilizaron el modelo *SWAT* para estimar la recarga de aguas subterráneas poco profundas en las cabeceras de las llanuras de Liverpool, Australia, identificando que las variaciones en la recarga pueden ser explicadas en particular por factores climáticos más que por cambios en el uso de suelo, lo que puede indicar que el comportamiento hidrológico está fuertemente condicionado por la región, el clima y la intervención antrópica. Por último, destaca la aplicación exitosa de *SWAT* por parte de Tang, Wang y Chen (2024) para la simulación de los procesos hidrológicos dentro la cuenca del río Yarkant, China, lo cual demuestra la utilidad del *software* para la simulación hidrológica en zonas glaciares y de alta montaña.

Estudios *SWAT* en erosión del suelo y sedimentación

Siendo fundamental las condiciones del suelo para el proceso de infiltración y recarga de agua subterránea, se identificaron numerosos

estudios enfocados en la aplicación del modelo *SWAT* para estimar procesos de erosión y sedimentación del suelo. Martínez-Casasnovas, Bonilla y Ramos (2012) emplearon *SWAT* para estimar la escorrentía superficial y la erosión del suelo en la región vinícola de Anoia-Penedès, España. Identificaron que los bosques y las áreas naturales eran responsables de la producción del 48.8 % de los sedimentos de la cuenca de estudio, mientras que el 51.2 % restante provenía de las áreas agrícolas. Ricci, De Girolamo, Abdelwahab y Gentile (2018) emplearon *SWAT* para reconocer la fuente de sedimentos en la cuenca Carapelle, Italia. Sus resultados mostraron que los sedimentos se originaban por procesos naturales en pendientes escarpadas, y propusieron que para su mitigación los tomadores de decisión debían adoptar prácticas agrícolas de conservación y medidas ambientales positivas. Panagopoulos, Dimitriou y Skoulikidis (2019) determinaron que la mayor producción de sedimentos y pérdida de suelo en la isla Samothraki se producía también en las zonas de mayor pendiente; los mismos autores detallaron que para su mitigación se debía implementar un plan integral de regeneración de la vegetación natural. De manera similar, Mosbahi, Benabdallah y Boussema (2013) demostraron mediante modelaciones con *SWAT* que las diferencias espaciales en las tasas de erosión dentro de la cuenca del río Sarrath, Marruecos, eran causadas principalmente por diferencias en los tipos de cobertura vegetal y gradiente de la pendiente. Bieger, Hörmann y Fohrer (2015) enfatizan en ello, tras identificar que tanto la superficie de escorrentía como la producción de sedimentos en la cuenca Xiangxi, China, variaba principalmente por el uso y tipos de suelo; sin embargo, concluyen que en zonas montañosas la pendiente cobra relevancia.

Otra aplicación del modelo *SWAT* para estimar la sedimentación de una cuenca, en este caso con el objetivo de demostrar la necesidad de

adoptar medidas de conservación de suelos para reducir la sedimentación en la presa Takerkoust, fue llevada a cabo por Markhi, Laftouhi, Grusson y Soulaïmani (2019), quienes mediante análisis gráficos y estadísticos, estimaron la sedimentación de la cuenca Tensif en Marruecos. Pacetti, Lompi, Petri y Caporali (2020) emplearon *SWAT* para evaluar diferentes escenarios de desmantelamiento de minas en Italia, con el objetivo de identificar las mejores estrategias para evitar la sedimentación en la presa San Cipriano. Los escenarios analizados mostraron que la reforestación natural o artificial de la zona que abarca la mina reducirían la escorrentía y con ello la sedimentación en la presa. Otro ejemplo que muestra la relevancia de la cobertura vegetal para disminuir la producción de sedimentos sería el trabajo de Schmalz *et al.* (2015), quienes identificaron que la mayor producción de sedimentos ocurre en tierras de cultivo, al contrario de los bosques, los cuales muestran una producción de sedimentos bastante baja. Respecto a la propuesta de acciones para disminuir la sedimentación destaca el estudio de Mishra, Froebrich y Gassman (2007), quienes establecieron, mediante modelación con *SWAT*, que la sedimentación en pequeñas cuencas de la India podía ser reducida hasta en un 64 % con la implementación de pequeñas represas como barreras para el sedimento. Por último, en el trabajo de Srinivasan, Ramanarayanan, Arnold y Bednarz (1998) se modeló con éxito la producción de sedimentos en la cuenca Mill Creek en Texas, EUA, y si bien no se determinó el origen de estos sedimentos, sí se identificaron áreas críticas dentro de la cuenca en donde se podrían implementar acciones para reducirlos.

Impacto de cambio climático

Distintas investigaciones destacan en la aplicación del modelo *SWAT* para modelar escenarios futuros e hipotéticos de cambio climático (Tabla 1). Varanou, Gkouvatsou, Baltas y Mimikou (2002) aplicaron el modelo *SWAT* para simular el ciclo del agua y el transporte de nitrógeno en la cuenca Ali Efenti, localizada en la porción central de Grecia. A partir de seis escenarios de cambio climático generados por modelos de circulación (GCM), se identificó una tendencia general a la disminución de flujo en ríos y canales, así como un incremento en la magnitud de inundaciones para ciertos periodos de retorno. En la investigación de Nunes, Seixas y Pacheco (2008) se modelaron distintos escenarios de cambio climático en regiones mediterráneas y se evaluaron distintos parámetros, como aumento en la temperatura, reducción de la precipitación e incremento en las concentraciones de CO₂. Los resultados indican de manera general una disminución en la escorrentía subsuperficial y el crecimiento de biomasa; por otro lado, se identifica un aumento en la producción de sedimentos. Rodríguez-Blanco *et al.* (2016) evaluaron los mismos parámetros para estimar su efecto en la producción de sedimentos en el noreste de España bajo escenarios contruidos con proyecciones climáticas y de concentración de CO₂. Los resultados muestran de manera general una disminución en los sedimentos en suspensión debido a la disminución del propio flujo de agua, aunque se incrementa en invierno por el aumento de zonas cultivadas, las cuales son la principal fuente de sedimentos.

Tabla 1. Principales resultados de estudios SWAT sobre el impacto del cambio climático.

Estudio	Región de estudio/cuenca	Principales resultados
Varanou <i>et al.</i> (2002)	Cuenca Ali Efenti, Grecia	Tendencia general a la disminución de flujo en ríos y canales, así como un incremento en la magnitud de inundaciones
Nunes <i>et al.</i> (2008)	Distintas regiones mediterráneas	Disminución en la escorrentía subsuperficial y el crecimiento de biomasa, y aumento en la producción de sedimentos
Rodríguez-Blanco <i>et al.</i> (2016)	Noreste de España	Disminución en los sedimentos en suspensión debido a la merma del propio flujo de agua
Pascual, López, Retana y Terradas (2015)	Cataluña, España	Reducción generalizada del flujo en ríos y arroyos, y afectaciones en el crecimiento, desarrollo y distribución de la vegetación
De Girolamo, Bouraoui, Buffagni, Pappagallo y Lo Porto (2017)	Sur de Italia	Incremento de la temperatura para todos los meses, reducción de la precipitación, disminución del rendimiento hídrico e incremento de la evapotranspiración
Sood, Muthuwatta y McCartney (2013)	Río Volta, África	Disminución de más del 40 % en el flujo del río como consecuencia de la propia mengua de la precipitación
Chien, Yeh y Knouft (2013)	Río Wabash, EUA	Descenso en el flujo del río debido a los cambios en la evapotranspiración y precipitación por el aumento en la temperatura
Huang, Krysanova y Hattermann (2015)	Grandes cuencas en Alemania	Generación de sequías en la cuenca del río Rhin, así como inundaciones en la cuenca del río Elba
Gosain, Rao y Basuray (2006)	12 cuencas en la India	Incremento de la severidad de las sequías y la intensidad de las inundaciones
Rosenberg <i>et al.</i> (1999)	Acuífero Ogalla, EUA	Reducción considerable de la recarga del acuífero bajo todos los escenarios de cambio climático
Nearing <i>et al.</i> (2005)	Cuencas Lucky Hills y Ganspoel, EUA	La erosión del suelo se ve más afectada que la escorrentía superficial ante cambios en la precipitación y la cobertura superficial

La investigación desarrollada por Pascual *et al.* (2015) se enfoca en la modelación en *SWAT* de dos escenarios de emisiones de CO₂ propuestos por el Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC): A2 (medio-alto) y B1 (medio-bajo) para estimar sus efectos en el flujo superficial de los cuerpos de agua. Sus resultados muestran una fuerte alteración en la dinámica del agua durante el curso del siglo XXI, sobre todo una reducción generalizada del flujo en ríos y arroyos; asimismo, se identifican afectaciones en el crecimiento, desarrollo y distribución de la vegetación. Más recientemente, De Girolamo *et al.* (2017) utilizaron *SWAT* para simular el balance hídrico bajo distintos escenarios de cambio climático en un sistema fluvial del sur de Italia. Dichos escenarios se construyeron con base en modelos de circulación global y modelos climáticos regionales. Los resultados muestran para el futuro (2030-2059) un incremento de la temperatura para todos los meses de 0.5 a 2.4°; una reducción de la precipitación de entre el 4 y 7 %; una disminución del rendimiento hídrico del 11 al 28 %, y un incremento de la evapotranspiración del 4 a 4.4 %.

Sood *et al.* (2013) utilizaron *SWAT* para evaluar el impacto de un escenario de cambio climático basado en el escenario IPCC A1B en la hidrología de la cuenca del río Volta en el oeste de África. La simulación indica una disminución de más del 40 % en el flujo del río como consecuencia de la propia baja de la precipitación y el aumento en la temperatura, por lo que los autores sugieren mejorar la gestión del agua subterránea y adoptar técnicas como la captación de agua de lluvia para intentar mitigar los efectos del cambio climático. Chien *et al.* (2013) modelaron por su parte nueve modelos de clima global (GCM) bajo un máximo de tres escenarios (A1B, A2, y B1) del informe especial sobre

escenarios de emisiones (SRES), para determinar su efecto en el flujo del río Wabash, EUA, del año 2051 al 2060. Las 26 proyecciones GCM muestran un descenso en el flujo del río debido a los cambios en la evapotranspiración y precipitación por el aumento en la temperatura. Ante esto se sugiere la implementación de estrategias específicas de gestión para mitigar los efectos potenciales del cambio climático en los recursos hídricos.

El efecto del cambio climático en la ocurrencia de inundaciones fue estudiado por Huang *et al.* (2015). Para ello se evaluó el desempeño de un conjunto de escenarios climáticos del proyecto ENSEMBLES para desarrollar proyecciones de inundaciones y sequías para grandes cuencas en Alemania. El estudio proyecta una tendencia creciente a padecer sequías en la cuenca Rhin, al igual que inundaciones en la cuenca Elba para el periodo 2021-2060. Otra investigación que consideró escenarios de cambio climático del proyecto ENSEMBLES fue el desarrollado por Stefanova, Krysanova, Hesse y Lillebø (2015). En esta ocasión, el modelo fue calibrado y conducido en tres periodos por 15 escenarios de cambio climático para un periodo futuro de 30 años con el objetivo de estudiar el impacto del cambio climático en la cuenca de la laguna Ría de Aveiro, en Portugal. Si bien los resultados indican una disminución moderada en las entradas de agua a la cuenca para los primeros dos periodos (5-7 %) y aumentando en el tercero (15 %), los autores señalan que la incertidumbre asociada con desarrollar proyecciones para 15 escenarios es muy alta.

Gosain *et al.* (2006) utilizaron *SWAT* para cuantificar el impacto del cambio climático en los recursos hídricos de los sistemas fluviales de India. La simulación de 12 cuencas se desarrolló utilizando una serie climática de 40 años (20 años de datos reales y 20 años de información

climática obtenida bajo un escenario gases de efecto invernadero GHC). El análisis inicial reveló un incremento en la severidad de las sequías y la intensidad de las inundaciones para varias partes del país con las proyecciones climáticas del escenario GHC. Rosenberg *et al.* (1999) intentaron anticipar los posibles impactos del cambio climático para la sostenibilidad del acuífero Ogalla, en EUA, como fuente de agua para la irrigación y otros propósitos en la región, con el objetivo de estimar sus efectos en el balance hídrico y sobre todo en la recarga de agua subterránea. Los autores modelaron tres proyecciones de cambio climático bajo distintos escenarios de temperatura, concentración de CO₂ y precipitación. Los resultados mostraron una reducción considerable de la recarga bajo todos los escenarios. Otra investigación afín fue la desarrollada por Nearing *et al.* (2005), quienes investigaron la respuesta de siete modelos de erosión de suelos bajo distintos escenarios de precipitación y cobertura del suelo. Los resultados indican que la erosión del suelo se ve más afectada que la escorrentía superficial ante cambios en la precipitación y la cobertura superficial. De igual manera, los resultados del estudio sugieren que existe un gran potencial de que el cambio climático incremente la tasa de erosión del suelo a nivel global, por lo que se recomienda adoptar medidas de conservación de suelos (Nearing *et al.*, 2005) o BMP.

Impacto de cambio de uso de suelo

Dentro de los trabajos en los que se ha aplicado el modelo *SWAT* para modelar distintos escenarios de cambio en el uso de suelo (Tabla 2) destacan los siguientes. Hamad, Eshtawi, Abushaban y Haboub (2012) modelaron mediante *SWAT* y la Herramienta Automatizada de Evaluación

de Cuencas Geoespaciales (AGWA) tres escenarios diferentes de cobertura de suelo en la Franja de Gaza, considerando una cobertura vegetal para el año 2007, el año 2020 y una cobertura totalmente urbanizada. Los resultados mostraron una disminución en la percolación dentro de las zonas urbanas de los distintos escenarios, así como un aumento gradual en la esorrentía; el artículo concluye con la recomendación de implementar la cosecha de agua como alternativa para superar el problema de déficit de aguas subterráneas. Recientemente, Valencia, Villegas, Hoyos, Duque-Villegas y Salazar (2024) condujeron en *SWAT* distintas simulaciones para la cuenca del río Chico, en la región Andina de Colombia, con el objetivo de examinar los efectos del cambio de uso de suelo y cobertura vegetal de la cuenca. Los resultados de su investigación sugieren que cambios en la cobertura boscosa provocan modificaciones principalmente en los flujos de agua superficiales y subterráneos, con pequeñas variaciones en la evapotranspiración. De acuerdo con sus mismos resultados, una cobertura boscosa del 100 % tendría un impacto positivo en los flujos de agua durante las temporadas de secas, asociados principalmente con un aumento en la infiltración y recarga de agua subterránea.

Tabla 2. Principales resultados de estudios *SWAT* sobre el impacto del cambio de uso de suelo dentro de una cuenca.

Estudio	Región de estudio/cuenca	Principales resultados
Hamad <i>et al.</i> (2012)	Franja de Gaza, Palestina	Disminución en la percolación dentro de las zonas urbanas, así como aumento gradual en la escorrentía. Se sugiere la implementación de cosecha de agua como alternativa para superar el problema de déficit de aguas subterráneas
Weber, Fohrer y Möller (2001)	Cuenca Aar, Alemania	Mientras aumenta el área de pastizal de un 20 a un 40 %, el porcentaje de áreas boscosas disminuye de modo significativo. Se identificó que entre mayor era la pérdida de área boscosa, mayor era la escorrentía superficial
Fohrer, Möller y Steiner (2002); Fohrer, Haverkamp y Frede (2005)	Cuenca Aar, Alemania	El cambio de uso de suelo tiene un alto impacto en el componente del balance hídrico, por lo que se sugiere acompañar los futuros cambios de suelo con algunas medidas de protección
Lorz, Volk y Schmidt (2007)	Cuencas boscosas virtuales	El impacto de los bosques y su ubicación juegan un papel importante en los aspectos ecológicos y financieros dentro de la gestión de una cuenca
Wu, Liu, Sohl y Young (2013)	Cuenca del río Cedar, EUA	A consecuencia de la expansión urbana, la escorrentía superficial se incrementa, mientras que el flujo base decrece de forma significativa
Getachew y Melesse (2012)	Cuenca Angereb, Etiopía	La disminución de cobertura boscosa, y el aumento de pastizales y tierras agrícolas ocasionan escorrentías más violentas en temporada de lluvias, y un descenso considerable de flujo durante la temporada de secas
Nsanzabaganwa <i>et al.</i> (2024)	Cuenca del río Nyabarongo, Nigeria	A consecuencia de la disminución de la cobertura boscosa y la proliferación de pastizales y zonas urbanas, se identifica un aumento en la escorrentía, y en la concentración de nitrógeno y fósforo en la cuenca
Valencia <i>et al.</i> (2024)	Cuenca del río Chico, región andina de Colombia	Cambios en la cobertura boscosa provocan modificaciones principalmente en los flujos de agua superficiales y subterráneos, con pequeñas variaciones en la evapotranspiración
Baker y Miller (2013)	Cuenca del río Njoro, este de África	Se identificó una marcada tendencia a incrementar la escorrentía y disminuir la recarga subterránea ante los cambios en el uso de suelo

Otra investigación que pone en evidencia el efecto del cambio en el uso del suelo dentro de la dinámica hídrica es el desarrollado por Weber *et al.* (2001), quienes mediante *SWAT* compararon el escenario actual de uso de suelo en la cuenca Aar, en Alemania, con un escenario en el que se incentivaba el desarrollo de pastizales, el cual fue desarrollado con el modelo ProLand. Los resultados demostraron que mientras aumentaba el área del pastizal de un 20 a un 40 %, el porcentaje de áreas boscosas disminuía de forma significativa. Asimismo, se identificó que entre mayor era la pérdida de área boscosa, mayor era la escorrentía superficial. Un hallazgo importante relativo a esta misma cuenca se refiere al alto impacto del cambio de uso de suelo en el componente del balance hídrico; esto, de acuerdo con el trabajo desarrollado por Fohrer *et al.* (2005); por ello que desde la investigación conducida por Fohrer *et al.* (2002) se sugirieran acompañar con algunas medidas de protección los futuros cambios de suelo en la cuenca. Por su parte, Lorz *et al.* (2007) compararon los resultados de la modelación en *SWAT* con los resultados obtenidos a partir de otros tres modelos respecto al impacto hipotético de una cobertura boscosa y otros cambios en el uso del suelo en la escorrentía total de una cuenca. En el estudio se concluye que el impacto de los bosques y su locación juegan un papel importante en los aspectos ecológicos y financieros dentro de la gestión de la cuenca.

Wu *et al.* (2013) proyectaron la cobertura vegetal y el cambio de uso de suelo en la cuenca del río Cedar, en EUA, mediante el desarrollo de escenarios futuros basados en el escenario de emisiones A1B a través del modelo de Previsión de Escenarios de Cambio en el Uso del Suelo (FORE-SCE), para predecir su impacto potencial en el ciclo y la calidad del agua en la cuenca. Los resultados de la modelación indican que a

consecuencia de la expansión urbana, la respuesta rápida a la escorrentía superficial se incrementa de modo significativo (cerca del 10.5 %), mientras que el flujo base decrece substancialmente (cerca del 7.3 %) a causa de la reducción en la infiltración. Getachew y Melesse (2012) han aplicado el modelo *SWAT* para analizar los cambios en el uso de suelo en la cuenca Angereb, Etiopía, y sus efectos en la escorrentía y los ingresos de agua a la cuenca. Respecto al cambio de uso de suelo, este fue examinado mediante la clasificación de imágenes satelitales y desarrollando un análisis espacial. Los resultados obtenidos indican que la disminución de cobertura boscosa, y el aumento de pastizales y tierras agrícolas ocasionan escorrentías más violentas en temporada de lluvias, y un descenso considerable de flujo durante la temporada de secas. También se encontró que las escorrentías más violentas incrementan la carga de sedimentos, confiriendo turbidez al agua.

Baker y Miller (2013) utilizaron tres mapas de uso del suelo, los cuales representan un periodo de 17 años en el que la cuenca del río Njoro, en el este de África, sufrió cambios significativos en su uso de suelo, al convertir grandes zonas boscosas en zonas de pastizales y cultivo, para modelar en *SWAT* su impacto en la respuesta hidrológica de la cuenca. Los resultados obtenidos indican una marcada tendencia a incrementar la escorrentía y disminuir la recarga subterránea ante los cambios en el uso de suelo, lo cual representa una amenaza importante a la disponibilidad de agua para uso humano. Los autores recomiendan continuar con estudios encaminados a determinar la viabilidad de implementar acciones de gestión territorial que contribuyen a modificar la escorrentía ante los cambios en el uso de suelo. Por último, destaca una investigación desarrollada más recientemente por Nsanzabaganwa *et al.* (2024), quienes condujeron un análisis en *SWAT* para identificar la

influencia del cambio del uso de suelo y la cobertura vegetal del año 2000 al 2020 (y con predicciones hasta 2030) en la escorrentía superficial y la concentración de nitrógeno y fósforo en la cuenca del río Nyabarongo, Nigeria. Los resultados indicaron que a consecuencia de la disminución de la cobertura boscosa y la proliferación de pastizales y zonas urbanas, además de la escorrentía superficial, la concentración de ambos contaminantes se incrementó de 2.46 a 17.43 kg/ha y de 15.36 a 158.8 kg/ha, respectivamente; siendo las zonas agrícolas y urbanas las más vulnerables. Como medida para mitigar este problema, además de una mejora en las medidas de conservación, los autores han sugerido la implementación de BMP.

Impacto combinado de cambio climático y uso de suelo

Diversas investigaciones desarrolladas en la aplicación de *SWAT* han incluido la modelación de escenarios combinados de cambio climático y cambios en el uso de suelo. Algunas de ellas son, por ejemplo, la de Hernández *et al.* (2000), quienes modelaron para una pequeña cuenca semiárida la escorrentía superficial originada a partir de seis tormentas hipotéticas bajo distintas coberturas vegetales, las cuales consistían en mezclas de matorral desértico y pastizales hasta un único tipo uniforme de cobertura terrestre, como ribereño, bosque, bosque de robles, bosque de mezquite, matorral desértico, pastizales, urbano, agricultura y tierras áridas. Los resultados mostraron una escorrentía media anual muy alta para las tierras áridas, las zonas urbanas y el matorral desértico; por otro lado, el bosque, bosque de robles y bosque de mezquites mostraron la escorrentía más baja.

El objetivo de la investigación de Pisinaras, Wei, Barring y Gemitzi (2014) fue el de identificar los efectos en la hidrología de determinada región en cuanto a los cambios de uso de suelo al pasar de zonas agrícolas a parques fotovoltaicos (PVP), tomando en cuenta los efectos anticipados del cambio climático. Los resultados mostraron que el potencial de escorrentía no mostraba un gran incremento para el cambio de uso de suelo a gran escala, sin embargo, el potencial de escorrentía sí aumentaba considerablemente en regiones de menores dimensiones, es decir, a nivel subcuenca. Choukri *et al.* (2020) examinaron los impactos del cambio climático y los cambios en el uso del suelo en la disponibilidad de agua y carga de sedimentos para un reservorio de agua en la cuenca Tleta, en Marruecos. Para ello se desarrollaron tres escenarios de cambio de uso de suelo y dos de cambio climático. Los resultados obtenidos muestran que el efecto combinado de los distintos escenarios origina una disminución en la entrada anual de agua y sedimentos al reservorio, lo que por un lado aumenta la vida del reservorio, pero también eleva el riesgo de escasez de agua en los meses más secos, por lo que se sugiere considerar otras fuentes alternativas de agua. Por último, Ertürk *et al.* (2014), calibraron y validaron un modelo en *SWAT* para predecir los efectos de distintos escenarios de cambio climático y cambio en el uso de suelo en el balance hídrico de la cuenca Köyceğiz-Dalyan, Marruecos. Los resultados del análisis muestran una disminución en todas las componentes del balance hídrico de la cuenca, por lo que se espera que la falta de agua sea un problema en un futuro. Asimismo, los autores sugieren migrar hacia métodos de irrigación más eficientes y desarrollar investigación enfocada a estudiar la viabilidad de implementar acciones de recarga artificial y captación de agua.

El impacto individual y combinado del uso/cobertura del suelo y el cambio climático en procesos hidrológicos fue analizado por Wang, Kalin, Kuang y Tian (2014) al aplicar el modelo *SWAT* en una cuenca costera de Alabama, EUA. Al emplear distintos escenarios desarrollados mediante un modelo de circulación global determinaron que la cuenca podría experimentar un incremento en la precipitación y temperatura en el futuro, lo que podría propiciar una urbanización dramática que llevaría a reducir los bosques, pastizales, tierras de cultivo y humedales. También identificaron (situación que se agrava cuando se contemplan escenarios combinados de cambio de uso/cobertura del suelo y cambio climático) que la escorrentía superficial aumenta, mientras el flujo base presenta un evidente descenso. Goldstein y Tarhule (2015) modelaron en *SWAT* el impacto de cultivar biocombustibles en la región de las Grandes Llanuras en EUA. Para ello usaron un escenario de cambio climático asociado con el escenario de emisiones A2 2040-2050, en el que existe un incremento en la temperatura de 1 a 2 °C, así como un escenario de cambio de uso de suelo en el que los pastos nativos, y los cultivos de trigo de invierno y centeno son reemplazados por pasto varilla. Los resultados muestran que durante el invierno, primavera y verano, el pasto varilla disminuye la escorrentía superficial, incrementando, a su vez, la evapotranspiración en un factor de 9.4 durante la primavera. Se concluye que tanto el cambio climático como el cultivo de pasto varilla son los factores más determinantes en los cambios en la escorrentía.

Tan, Ibrahim, Yusop, Duan y Ling (2015) investigaron los impactos combinados del cambio climático y cambio en el uso del suelo en los componentes hidrológicos de la cuenca del río Johor en Malasia. Para ello calibraron un modelo en *SWAT* utilizando datos medidos de escorrentía mensual. Los resultados muestran que el impacto combinado del cambio

climático y cambio en el uso del suelo causa un incremento en la escorrentía y evaporación anual de 4.4 y 2.2 %, respectivamente. Por su parte, Pohle, Koch, Conradt, Gädeke y Grünewald (2015) estudiaron el impacto potencial del cambio climático y cambio de uso de suelo en las cuencas europeas de Schwarze Elster. Para ello se consideraron dos modelos de clima regional, al igual que cambios de carácter antrópico, como es el incremento de cultivos energéticos y el aumento en la depresión del cono de agua subterránea asociado con actividades mineras. Los resultados sugieren que el impacto del cambio climático en la descarga natural de la cuenca es sustancial y excede los efectos de los cultivos energéticos o la actividad minera. Por lo tanto, los autores concluyen que el impacto regional de las actividades antrópicas es secundario con respecto al impacto del cambio climático.

Finalmente, en una investigación más reciente desarrollada por Suwannachai, Sriworamas, Sivanpheng y Kangrang (2024), se llevó a cabo la aplicación del modelo *SWAT* para identificar el impacto del cambio de uso de suelo y cambio en la precipitación en las cuencas Lam Saphung, Phrom, y Chern, en Tailandia. Los resultados demostraron que además del aumento en la precipitación, el cambio de uso de suelo de bosques a zonas residenciales podía incrementar también la escorrentía hasta en un 77.78 %.

Estudios *SWAT* en BMP

Las mejores prácticas de gestión o BMP por sus siglas en inglés (*best management practices*) se refiere a las prácticas de conservación de agua y suelo, técnicas de gestión y acciones sociales encaminadas a proteger el medio ambiente (Sharpley *et al.*, 2006). En múltiples ejemplos

estudiados, *SWAT* ha probado ser una herramienta práctica de toma de decisión al momento de sugerir e implementar BMP (Tabla 3). Estos estudios en *SWAT* incluyen la identificación de áreas críticas dentro de la cuenca en las que requiera gestionar el agua y el suelo, así como la investigación de su respuesta ante estrategias alternativas de gestión (Aloui *et al.*, 2023).

Tabla 3. Principales resultados de estudios *SWAT* sobre la implementación de BMP.

Estudio	Región de estudio/cuenca	Principales resultados
López-Ballesteros Senent-Aparicio, Srinivasan y Pérez-Sánchez (2019)	Cuenca Beal, España	Las presas filtrantes son el BMP más efectivo, con una reducción del 90 % en la producción de sedimentos, 15% en el nitrógeno total y 22% en el fósforo total, seguido de la reforestación
Mosbahi y Benabdallah (2020)	Cuenca de río Sarrath, Túnez	Mediante la implementación de terrazas paralelas y reforestación se podría reducir la producción de sedimentos entre un 5 y 43 %, mientras que la escorrentía superficial podría reducirse entre un 5 y 32 %
Briak, Mrabet, Moussadek y Aboumaria (2019)	Cuenca del río Kalaya, Marruecos	Las terrazas redujeron en un 28 % la producción de sedimentos, seguido del cultivo en franjas, con una disminución del 9 %
Ben-Khelifa <i>et al.</i> (2017)	Cuenca Sbaihia, Túnez	Las terrazas, implementadas en aproximadamente el 50 % del área de la cuenca, reducían la escorrentía superficial cerca del 19 % y la producción de sedimentos en un 22 %
Strauch, Lima, Volk, Lorz y Makeschin (2013)	Cuenca del río Pipiripau, Brasil	La implementación combinada de terrazas paralelas y barraginhas pueden reducir la escorrentía superficial y la carga de sedimentos hasta en un 40 %
Hunink, Niadas, Antonaropoulos, Droogers y De Vente (2013)	Cuenca Tana, Kenia	Dependiendo del nivel de adopción de las BMP, la producción de sedimentos podría disminuir hasta en un 25 %
Tripathi, Panda y Raghuwanshi (2003)	Cuenca Nagwan, India	No todas las subcuencas de una cuenca agrícola contribuyen a la descarga, la producción de sedimentos y las pérdidas de nutrientes
Vaché, Eilers y Santelmann (2002)	Cuencas Buck y Walnut Creek, EUA	Un uso amplio de BMP, como franjas ribereñas, humedales artificiales, cauces de agua con césped, franjas filtrantes y bordes de campos, podrían potencialmente reducir las cargas de sedimentos de un 37 a 67 % y de nutrientes de un 54 a 75 %
Bracmort, Arabi, Frankenberger, Engel y Arnold (2006)	Cuencas Smith-Fray y Dreisbach, Iowa, EUA	Los BMP en buenas condiciones disminuyeron el promedio anual de carga de sedimentos entre un 16 y 32 % y la carga de fósforo de un 10 a 24 %; mientras que los BMP en malas condiciones de un 7 a 10 % y de un 7 a 17 %, respectivamente
Xu, Fu y He (2013)	Cuenca Yanhe, China	El aumento en el número de presas filtrantes se ha visto reflejado en una reducción considerable de la escorrentía superficial y la carga de sedimentos en la cuenca
Mishra <i>et al.</i> (2007)	Cuenca Banha, India	La pérdida de sedimentos podría ser reducida en más del 64 %, adoptando las presas filtrantes como barreras para los sedimentos

López-Ballesteros *et al.* (2019) han desarrollado un modelo en *SWAT* para identificar la efectividad de cinco BMP (siembra a contorno, franjas filtrantes, reforestación, aplicación de fertilizantes y presas filtrantes o de retención), individualmente y en combinación, para probar su impacto en la reducción de la producción de nutrientes y sedimentos en la cuenca Beal, España. Los resultados muestran que las presas filtrantes son el BMP más efectivo, con una reducción del 90 % en la producción de sedimentos, 15 % en el nitrógeno total y 22 % en el fósforo total; seguido de la reforestación. Se identificó también que la efectividad de las BMP aumenta cuando se evalúan en combinación. Mosbahi y Benabdallah (2020) aplicaron el modelo *SWAT* para predecir la erosión del suelo sobre la cuenca de río Sarrath, Túnez, y evaluar la efectividad de diferentes prácticas de manejo de suelo para reducir la escorrentía y la erosión del suelo. La calibración y validación del modelo fue realizada a escala mensual para el periodo 2001-2008, en el que se evaluaron siete escenarios de gestión; para ello, se realizaron una o más modificaciones a los parámetros introducidos al modelo *SWAT*. Los resultados mostraron que mediante la implementación de medidas como terrazas paralelas y reforestación se podría reducir la producción de sedimentos entre un 5 y 43 %, mientras que la escorrentía superficial podría reducirse entre un 5 y 32 %; esto es más efectivo cuando las acciones se implementan de manera combinada. Briak *et al.* (2019) han evaluado tres BMP ampliamente utilizadas en Marruecos: cultivo siguiendo las curvas de nivel, cultivo en franjas y terrazas. Con el objetivo de identificar la más apropiada para disminuir la erosión del suelo, los parámetros generales introducidos al modelo *SWAT* se modificaron para reflejar los efectos de implementar las diferentes BMP. De acuerdo con los resultados, las terrazas fueron las más efectivas, al reducir en un 28 % la producción de

sedimentos; seguidas del cultivo en franjas, con una reducción del 9 %, y por último el cultivo que sigue las curvas de nivel, el cual aumentaba la producción de sedimentos.

Ben-Khelifa *et al.* (2017) emplearon el modelo *SWAT* para analizar y parametrizar los efectos de las terrazas de banco en la producción de sedimentos y la hidrología de una pequeña cuenca agrícola en Túnez. La calibración y validación del modelo se llevaron a cabo a partir de los datos de precipitación diaria de 1994 a 2000, así como un estudio batimétrico de alta resolución del lago localizado en la desembocadura de la cuenca. Los resultados indicaron que las terrazas implementadas en aproximadamente el 50 % del área de la cuenca reducían la escorrentía superficial cerca del 19 % y la producción de sedimentos en un 22 %. Strauch *et al.* (2013) calibraron y validaron un modelo *SWAT* para el río Pipiripau en Brasil, con la finalidad de determinar los efectos de distintas BMP en su carga de sedimentos. Los resultados obtenidos mostraron que la implementación combinada de BMP estructurales, como terrazas paralelas y pequeñas depresiones en el suelo, denominadas "barraginhas", podían reducir la escorrentía superficial y la carga de sedimentos hasta en un 40 %. Con el mismo objetivo, Hunink *et al.* (2013) modelaron en *SWAT* el potencial de los cultivos sobre curva de nivel y presas filtrantes para disminuir la erosión del suelo en la cuenca Tana en Kenia. La influencia de su implementación se evaluó considerando tres escenarios diferentes a partir de la modificación en el factor para la pérdida de suelos, la pendiente general de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU), y el número de curva de escorrentía. Los resultados mostraron que, dependiendo del nivel de adopción de las BMP, la producción de sedimentos podría disminuir hasta en un 25 %. Tripathi *et al.* (2003), por su parte, lograron identificar zonas críticas o prioritarias

para la implementación de BMP encaminadas a la gestión del suelo y el agua dentro de la cuenca Nagwan en India; además de determinar que no todas las subcuencas de una cuenca agrícola contribuyen a la descarga, la producción de sedimentos y las pérdidas de nutrientes.

Vaché *et al.* (2002) han empleado también el modelo *SWAT* para evaluar tres escenarios de utilización de distintos BMP y su efecto en la descarga de agua superficial y carga de sedimentos y nitratos en las cuencas Buck y Walnut Creek, dentro de la región conocida como “el cinturón de maíz” en EUA. Los resultados demostraron que mediante la realización de cambios en las prácticas agrícolas, como conversión a labranza de conservación, cultivos intercalados en franjas, pastoreo rotativo, áreas de conservación designadas, y un uso amplio de BMP como franjas ribereñas, humedales artificiales, cauces de agua con césped, franjas filtrantes y bordes de campos, podrían potencialmente reducir las cargas actuales de sedimentos de un 37 a 67 % y de nutrientes de un 54 a 75 %. Bracmort *et al.* (2006) modelaron, por su parte, el deterioro y la eficiencia a largo plazo de los BMP para mejorar la calidad del agua de tierras agrícolas en las cuencas Smith-Fray y Dreisbach, ubicadas en Iowa, EUA. Los BMP fueron representados a través de la modificación de parámetros en *SWAT* para reflejar el impacto que las prácticas tienen en los procesos simulados dentro del propio modelo. Los resultados demostraron que los BMP en buenas condiciones redujeron el promedio anual de carga de sedimentos entre un 16 y 32 %, y la carga de fósforo de un 10 a 24 %; mientras que los BMP en malas condiciones reducen estos rangos a un 7 a 10 % y de un 7 a 17 %, respectivamente.

Xu *et al.* (2013) han aplicado un modelo *SWAT* para simular la escorrentía y carga de sedimentos en la cuenca Yanhe, China, entre 1950 y 1960, periodo en el que existía un escaso número de presas de

filtrantes. El modelo fue calibrado y validado para el periodo mencionado y posteriormente usado para simular el efecto hidrológico ante un mayor número de presas filtrantes construidas recientemente. Los resultados mostraron que el aumento en el número de presas filtrantes en el área de estudio se ha visto reflejado en una reducción considerable de la escorrentía superficial y la carga de sedimentos en la cuenca, mostrando con ello su efectividad como medidas de control de suelo.

Por su parte Mishra *et al.* (2007) llevaron a cabo una evaluación con fines similares para la cuenca Banha, India. Una vez calibrado y validado el modelo mediante la comparación de datos estimados y datos observados, este fue ejecutado con y sin presas filtrantes, con el objetivo de determinar su efectividad como barrera para el sedimento. Las estimaciones del modelo mostraron que la pérdida de sedimentos podría ser reducida en más del 64 % adoptando las presas filtrantes como barreras para los sedimentos.

Discusión

Como se ha mencionado, durante el proceso de identificación y recopilación de artículos, se ha observado un limitado número de investigaciones que traten de manera específica o particular la aplicación del modelo *SWAT* a fin de evaluar la pertinencia de implementar acciones adaptativas de gestión sustentable del agua con el objetivo principal de disminuir el déficit hídrico de cuerpos de agua subterráneos bajo escenarios presentes y futuros; de modo que para el objetivo de este estudio se juzgó de utilidad incluir aquellas investigaciones encaminadas a conocer la dinámica hídrica de una cuenca mediante la simulación de aguas superficiales y subterráneas, así como del suelo y la producción de

sedimentos; se consideraron también los artículos que evaluaron el impacto de los efectos de distintos escenarios de cambio climático y cambio en el uso de suelo; y finalmente aquellos artículos en los que se ha abordado la implementación de distintos BMP, que si bien en la mayoría de las investigaciones se han evaluado con la finalidad de determinar sobre todo su capacidad de reducir la producción de sedimentos y la escorrentía superficial, han sido considerados, ya que muchas de estas acciones resultan útiles también para captar e infiltrar agua al subsuelo.

Durante el proceso de análisis se ha podido identificar que, con independencia del objetivo de la simulación, todas las investigaciones comparten un proceso de calibración y validación del modelo *SWAT*; destacan los parámetros de número de curva (CN) y densidad aparente del suelo (SOL_BD), como unos de los más sensibles y relevantes para la simulación de escorrentías (Hussain *et al.*, 2024). Una vez concluidos los procesos de calibración y validación, es posible utilizar dicho modelo evaluando distintos escenarios, ya sea de cambio climático, cambio de uso de suelo, implementación de BMP, o una combinación de ellos. Como parte del proceso de simulación de escenarios de cambio climático, cambio de uso de suelo o la combinación de ambos, se observa que en las investigaciones se emplean escenarios propuestos con anterioridad, se construyen los propios a partir de otros, o bien se utilizan herramientas y modelos externos al propio modelo *SWAT* para su desarrollo.

Ejemplos de esto es la recuperación y uso del escenario de cambio climático del proyecto ENSEMBLES para predecir inundaciones y sequías (Huang *et al.*, 2015; Stefanova *et al.*, 2015); el empleo del escenario A1B (Sood *et al.*, 2013), y A2 del IPCC para estimar los efectos del cambio climático en la hidrología superficial (Pascual *et al.*, 2015) y subterránea

de una cuenca (Goldstein & Tarhule, 2015); la construcción de escenarios de cambio climático a partir de modelos climáticos globales, modelos de circulación global y modelos climáticos regionales para simular los cambios en el balance hídrico de un sistema fluvial (Rosenberg *et al.*, 1999; Ertürk *et al.*, 2014; Pohle *et al.*, 2015; De Girolamo *et al.*, 2017), o la construcción de escenarios de cambio climático a partir de los escenarios A1B, A2 y B1 del SRES, también con el objetivo de simular el balance hídrico de una cuenca (Chien *et al.*, 2013). Una metodología similar se ha identificado para la definición de los escenarios de cambio de uso de suelo, los cuales se han construido principalmente a partir del análisis de la tendencia actual de uso de suelo en las regiones de estudio considerando cambios antrópicos (Ertürk *et al.*, 2014; Tan *et al.*, 2015; Pohle *et al.*, 2015), y empleándose también la herramienta automatizada de evaluación de cuencas geoespaciales (AGWA) (Hamad *et al.*, 2012), el modelo ProLand (Hamad *et al.*, 2012; Weber *et al.*, 2001) y el escenario A1B del modelo FORE-SCE (Wu *et al.*, 2013).

Respecto a las metodologías para simulación de los BMP, se ha identificado un proceso similar al de los escenarios de cambio climático y de uso de suelo, el cual implica la simulación de un escenario base una vez que los parámetros de entrada del modelo ya han sido calibrados y validados, para a continuación realizar nuevas simulaciones contemplado la implementación de las BMP, lo cual permite identificar los efectos que estas acciones tendrán en la cuenca. Si bien las metodologías aplicadas para la incorporación de las BMP en el modelo son diversas o inclusive en algunos casos no son especificadas, se ha identificado una serie de parámetros que son utilizados repetidamente para incorporar BMP en las modelaciones SWAT (Tabla 4). Por ejemplo, se han encontrado modificaciones al factor de curva de nivel (CN) y factor de práctica USLE

(CONT_P) en el modelo *SWAT* para simular prácticas de siembra siguiendo las curvas de nivel, el cultivo en franjas y la implementación de terrazas (Briak *et al.*, 2019; López-Ballesteros *et al.*, 2019). La modificación en el parámetro *FILTERW* para simular las franjas filtrantes (López-Ballesteros *et al.*, 2019); la aplicación del módulo de actualización de uso de tierra (LUU) para simular acciones de reforestación (López-Ballesteros *et al.*, 2019) y la simulación de presas filtrantes y barraginhas, considerándolas como embalses (*ponds*) (Strauch *et al.*, 2013), los cuales son simulados en el módulo de embalses (.pnd) usando el parámetro PND_FR (López-Ballesteros *et al.*, 2019).

Tabla 4. Variables modificadas en el *software SWAT* para la incorporación de las BMP en las simulaciones hidrológicas.

Acciones	Variables modificadas en <i>SWAT</i> para su incorporación en las simulaciones	Estudio
Terrazas/cultivos en contorno	Factor de curva de nivel para prácticas de contorno (CONT_CN)	López-Ballesteros <i>et al.</i> (2019)
	Factor de curva de nivel (CN)	Briak <i>et al.</i> (2019)
	Factor USLE P para prácticas de contorno (CONT_P)	Briak <i>et al.</i> (2019)
	Número de curva de escurrimiento SCS inicial para condiciones de humedad II (CN2)	Bracmort <i>et al.</i> (2006); Strauch <i>et al.</i> (2013); Mosbahi y Benabdallah (2020)
	Longitud media de la pendiente (m) para terrazas (TERR_SL) o (SL)	Ben-Khelifa <i>et al.</i> (2017)
	Longitud media de la pendiente (m) (SLSUBBSN)	Bracmort <i>et al.</i> (2006); Mosbahi y Benabdallah (2020)
	Factor de práctica de soporte de ecuación USLE (USLE_P)	Bracmort <i>et al.</i> (2006); Strauch <i>et al.</i> (2013); Mosbahi y Benabdallah (2020)
Franjas de infiltración	Ancho de la franja de filtro en el borde del campo (m) (FILTERW)	Bracmort <i>et al.</i> (2006); López-Ballesteros <i>et al.</i> (2019)
	Número de curva de escurrimiento SCS inicial para condiciones de humedad II (CN2)	Hunink <i>et al.</i> (2013)
	Pendiente media de la pendiente (m/m) (HRU_SLP)	Hunink <i>et al.</i> (2013)
Presas filtrantes y estanques de infiltración	Fracción del área de la subcuenca que drena hacia estanques (PND_FR)	Strauch <i>et al.</i> (2013); López-Ballesteros <i>et al.</i> (2019)

Para simular el efecto de las diferentes terrazas se han modificado los factores de práctica USLE (CONT_P) y número de curva de escurrimiento SCS inicial para condiciones de humedad II (CN2) (Strauch *et al.*, 2013),

y en algunas investigaciones también la pendiente (SL) (Ben-Khelifa *et al.*, 2017), (SLSUBBSN) (Mosbahi & Benabdallah, 2020), y el factor de soporte de práctica (USLE_P) (Bracmort *et al.*, 2006; Mosbahi & Benabdallah, 2020). Por otro lado, algunos autores han optado por modificar los parámetros CN2, PUSLE y pendiente media del HRU (HRU_SLP) para la simulación de los cultivos sobre las curvas de nivel y las presas filtrantes (Hunink *et al.*, 2013).

Como parte de los resultados obtenidos en los distintos artículos de aplicación *SWAT*, en los estudios de suelo y sedimentación se ha identificado que la sedimentación en una cuenca es producida principalmente por diferencias en el tipo de cobertura vegetal y el gradiente de la pendiente (Mosbahi *et al.*, 2013), siendo menor en zonas boscosas y considerablemente mayor en regiones agrícolas (Martínez-Casasnovas *et al.*, 2012; Schmalz *et al.*, 2015) y/o escarpadas de la cuenca (Ricci *et al.*, 2018; Panagopoulos *et al.*, 2019; Bieger *et al.*, 2015). Respecto a los escenarios de cambio climático, se ha identificado cómo las variaciones en el clima y las concentraciones de CO₂ tienen un efecto directo en la hidrología, erosión del suelo y producción de sedimentos de la cuenca (Varanou *et al.*, 2002; Nearing *et al.*, 2005; Gosain *et al.*, 2006; Nunes *et al.*, 2008; Sood *et al.*, 2013; Chien *et al.*, 2013; Stefanova *et al.*, 2015; Rodríguez-Blanco *et al.*, 2016); en la sostenibilidad de las aguas subterráneas (Rosenberg *et al.*, 1999); en el aumento del riesgo de padecer eventos extremos, como sequías e inundaciones (Huang *et al.*, 2015), y en el crecimiento, desarrollo y distribución de la vegetación (Pascual *et al.*, 2015).

Por su parte, los escenarios de cambio de uso de suelo y cobertura vegetal evidencian un claro aumento en la escorrentía superficial dentro de las cuencas ante la pérdida de la cobertura boscosa (Weber *et al.*,

2001; Wu *et al.*, 2013), con un aumento considerable en tierras áridas, pastizales, zonas urbanas, zonas de matorrales y zonas de cultivo (Hernández *et al.*, 2000; Hamad *et al.*, 2012; Getachew & Melesse, 2012). Además, se ha identificado que estos cambios en el uso del suelo también disminuyen la recarga de agua subterránea (Baker & Miller, 2013) y el flujo base (Wang *et al.*, 2014). Por último, se ha determinado que el efecto combinado de cambio climático y cambio en el uso del suelo tiende a ser más severo que al evaluarse de manera independiente cada uno de ellos, y en su evaluación conjunta tiende a ser más relevante el cambio climático respecto al cambio de uso de suelo (Pohle *et al.*, 2015). Se debe hacer notar que además de los cambios en la escorrentía y producción de sedimentos, se ha reconocido también que su efecto combinado ocasiona cambios en la evaporación (Tan *et al.*, 2015). Aunado a todo esto, se identifica una dependencia importante entre los cambios en el clima y en el uso del suelo; dicho fenómeno se observa, por ejemplo, en la reducción de bosques o humedales ante una urbanización dramática ocasionada por cambios en la precipitación y el clima (Wang *et al.*, 2014).

Como acciones para reducir la erosión y la producción de sedimentos (Tabla 5), se ha propuesto en distintas investigaciones la implementación de pequeñas represas (Mishra *et al.*, 2007); la reforestación natural o artificial (Pacetti *et al.*, 2020); la regeneración de la vegetación natural (Panagopoulos *et al.*, 2019), o la aplicación de cualquier otra medida de conservación de suelos (Nearing *et al.*, 2005; Markhi *et al.*, 2019). Asimismo, como medidas para mitigar y hacer frente a la alteración en el balance hídrico a consecuencia del cambio climático y cambio en el uso de suelo (Tabla 5), se ha sugerido considerar fuentes alternativas de agua (Choukri *et al.*, 2020), como la captación y cosecha de agua (Hamad *et al.*, 2012; Sood *et al.*, 2013; Ertürk *et al.*, 2014); la

implementación de estrategias específicas de gestión para mitigar los efectos potenciales del cambio climático en los recursos hídricos (Chien *et al.*, 2013), y la realización de estudios encaminados a determinar la viabilidad de implementar acciones de gestión territorial que contribuyen a modificar la escorrentía ante los cambios en el uso de suelo (Baker & Miller, 2013).

Tabla 5. Acciones más efectivas para la reducción en la erosión del suelo, la producción de sedimentos y la disminución en la escorrentía de acuerdo con su simulación en *SWAT*.

Objetivo	Acciones más efectivas	Estudio
Reducción de la erosión del suelo y la producción de sedimentos	Pequeñas represas	Mishra <i>et al.</i> (2007)
	Regeneración de la vegetación natural	Panagopoulos <i>et al.</i> (2019)
	Reforestación natural o artificial	López-Ballesteros <i>et al.</i> (2019); Pacetti <i>et al.</i> (2020)
	Terrazas y cultivo en curvas de nivel	Briak <i>et al.</i> (2019)
	Franjas ribereñas, humedales artificiales, cauces de agua con césped, franjas filtrantes, bordes de campos	Vaché <i>et al.</i> (2002)
	Presas filtrantes	López-Ballesteros <i>et al.</i> (2019)
	Medidas de conservación de suelos	Nearing <i>et al.</i> (2005); Markhi <i>et al.</i> (2019)
Resiliencia a la alteración en el balance hídrico a consecuencia del cambio climático y cambio en el uso de suelo	Captación y cosecha de agua	Hamad <i>et al.</i> (2012); Sood <i>et al.</i> (2013); Ertürk <i>et al.</i> (2014)
	Implementación de estrategias específicas de gestión para mitigar los efectos potenciales del cambio climático en los recursos hídricos	Chien <i>et al.</i> (2013)
Reducción de la escorrentía superficial y la producción de sedimentos	Reforestación y terrazas paralelas	Mosbahi y Benabdallah (2020)
	<i>Barraginhas</i>	Strauch <i>et al.</i> (2013)
	Presas filtrantes	Hunink <i>et al.</i> (2013)
	Terrazas en general	Strauch <i>et al.</i> (2013); Ben-Khelifa <i>et al.</i> (2017)

Respecto a las BMP, se identificó una alta efectividad de las presas filtrantes, reforestación (López-Ballesteros *et al.*, 2019), franjas ribereñas, humedales artificiales, cauces de agua con césped, franjas filtrantes, bordes de campos (Vaché *et al.*, 2002), terrazas y cultivo en curvas de nivel (Briak *et al.*, 2019) para disminuir la erosión y producción de sedimentos. Para reducir también la producción de sedimentos y, a su vez, la escorrentía superficial, se identificó una alta efectividad de la reforestación, las terrazas paralelas (Mosbahi & Benabdallah, 2020), los “barraginhas” (Strauch *et al.*, 2013), las presas filtrantes (Hunink *et al.*, 2013) y las terrazas en general (Strauch *et al.*, 2013; Ben-Khelifa *et al.*, 2017).

Conclusiones

De manera generalizada, las metodologías empleadas o desarrolladas en los distintos artículos cuentan con la elaboración y simulación de un escenario base, el cual es calibrado y validado, y luego utilizado para la simulación de diferentes escenarios de cambio climático, cambio en el uso de suelo, escenarios combinados o escenarios que incluyen la implementación de distintas acciones BMP, que son incorporadas al modelo mediante la modificación de algunos parámetros en *SWAT*, como curva de nivel y pendiente del terreno. Los resultados de las distintas investigaciones muestran de manera clara los efectos adversos que tanto el cambio climático como los cambios en el uso de suelo de naturaleza antrópica ocasionan en la dinámica hidrológica y edafológica de una cuenca; asimismo, se identifica una fuerte correlación y dependencia de estos cambios. Se ha constatado que fenómenos como el aumento en la escorrentía superficial, erosión del suelo, producción de sedimentos o

disminución de la recarga hídrica son propiciados y agravados por el cambio climático y cambio en el uso de suelo, como por ejemplo la conversión de zonas forestales a zonas agrícolas o urbanas.

Como acciones para disminuir la escorrentía superficial se ha reconocido una gran efectividad de las presas filtrantes, franjas ribereñas, humedales artificiales, cauces de agua con césped, franjas filtrantes, bordes de campos, terrazas, cultivo en curvas de nivel, reforestación natural o artificial, y regeneración de la vegetación natural, para reducir la erosión del suelo y la producción de sedimento. Para disminuir la producción de sedimentos y, a su vez, la escorrentía superficial, se distinguió una alta efectividad de la reforestación, terrazas paralelas, “barraginhas”, presas filtrantes y terrazas en general. De igual forma, como medidas para mitigar y hacer frente a la alteración en el balance hídrico a consecuencia del cambio climático y cambio en el uso de suelo, se ha sugerido considerar fuentes alternativas de agua, como la captación y cosecha de agua, implementación de estrategias específicas de gestión para mitigar los efectos potenciales del cambio climático en los recursos hídricos, y realización de estudios encaminados a determinar la viabilidad de implementar acciones de gestión territorial que contribuyen a modificar la escorrentía ante los cambios en el uso de suelo. Finalmente, el presente artículo demuestra la utilidad del modelo *SWAT* para desarrollar simulaciones encaminadas a determinar el efecto que tiene en una cuenca la adopción de medidas de conservación de suelo, fuentes alternativas de agua y acciones adaptativas de gestión sustentable del agua. Sin embargo, se considera pertinente y deseable que en un futuro se desarrollen más investigaciones en estos últimos dos temas, pues los trabajos dirigidos a atender de manera específica tales objetivos son escasos. Ello permitirá el desarrollo de otras metodologías para la

simulación de acciones de gestión sustentable del agua en el modelo *SWAT*, lo cual representará una herramienta de suma relevancia para los tomadores de decisión.

Agradecimientos

A la Universidad de Guanajuato y a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) por el apoyo recibido para hacer posible la realización de la presente investigación.

Referencias

- Aloui, S., Mazzoni, A., Elomori, A., Aoussi, J., Boufekane, A., & Zghibi, A. (2023). A review of Soil and Water Assessment Tool (SWAT) studies of Mediterranean catchments: Applications, feasibility, and future directions. *Journal of Environmental Management*, 326, 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116799>
- Baker, T., & Miller, S. (2013). Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) to assess land use impact on water resources in an East African watershed. *Journal of Hydrology*, 486, 100-111. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.01.041>
- Ben-Khelifa, M., Hermassi, W., Strohmeier, S., Zucca, C., Ziadat, F., Boufaroua, M., & Habaieb, H. (2017). Parameterization of the effect of bench terraces on runoff and sediment yield by SWAT modelling in a small semi-arid watershed in northern Tunisia. *Land Degradation & Development*, 28(6), 1568-1578. <https://doi.org/10.1002/ldr.2685>

- Bieger, K., Hörmann, G., & Fohrer, N. (2015). Detailed spatial analysis of SWAT-simulated surface runoff and sediment yield in a mountainous watershed in China. *Hydrological Sciences Journal*, 60(5), 784-800. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.965172>
- Bracmort, K. S., Arabi, M., Frankenberger, J. R., Engel, B. A., & Arnold, J. G. (2006). Modeling long-term water quality impact of structural BMPs. *Transactions of the ASABE*, 49(2), 367-374. <https://doi.org/10.13031/2013.20411>
- Briak, H., Mrabet, R., Moussadek, R., & Aboumaria, K. (2019). Use of calibrated SWAT model to evaluate the effects of agricultural BMPs on sediments of the Kalaya River Basin (North of Morocco). *International Soil and Water Conservation Research*, 7(2), 176-183. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2019.02.002>
- Carvalho-Santos, C., Monteiro, A. T., Azevedo, J. C., Pradinho-Honrado, J., & Nunes, J. P. (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. <https://doi.org/10.1007/s11269-017-1672-z>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.03.026>

- Choukri, F., Raclot, D., Naimi, M., Chikhaoui, M., Nunes, J. P., Huard, F., Hérivaux, C., Sabir, M., & Pépin, Y. (2020). Distinct and combined impacts of climate and land use scenarios on water availability and sediment loads for a water supply reservoir in northern Morocco. *International Soil and Water Conservation Research*, 8(2), 141-153. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2020.03.003>
- Chung, I.-M., Lee, J., Won, N., Na, H., Woo, S., Kim, Y., & Kim, G.-B. (2015). Estimating exploitable amount of groundwater abstraction using an integrated surface water-groundwater model: Mihocheon watershed, South Korea. *Hydrological Sciences Journal*, 60(5), 863-872. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.980261>
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (9 de octubre, 2019). *Usos del agua: uso agrupado abastecimiento público*. Recuperado de <https://www.gob.mx/conagua/acciones-y-programas/usos-del-agua>
- Conagua, Comisión Nacional del Agua. (2022). *Estadísticas del agua en México 2021*. Ciudad de México, México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.
- De Girolamo, A. M., Bouraoui, F., Buffagni, A., Pappagallo, G., & Lo Porto, A. (2017). Hydrology under climate change in a temporary river system: Potential impact on water balance and flow regime. *River Research and Applications*, 33(8), 1229-1240. <https://doi.org/10.1002/rra.3165>
- Ertürk, A., Ekdal, A., Gürel, M., Karakaya, N., Guzel, C., & Göneng, E. (2014). Evaluating the impact of climate change on groundwater resources in a small Mediterranean watershed. *Science of the Total Environment*, 499, 437-447. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.07.001>

- Fernández, R. (2017). Utilización del programa "SWAT" para la estimación de la emisión de sedimentos en cuencas. *TRIM: Tordesillas Revista de Investigación Multidisciplinar*, 12, 21-32.
- Fohrer, N., Haverkamp, S., & Frede, H.-G. (2005). Assessment of the effects of land use patterns on hydrologic landscape functions: Development of sustainable land use concepts for low mountain range areas. *Hydrological Processes*, 19(3), 659-672. <https://doi.org/10.1002/hyp.5623>
- Fohrer, N., Möller, D., & Steiner, N. (2002). An interdisciplinary modelling approach to evaluate the effects of land use change. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 27(9-10), 655-662. [https://doi.org/10.1016/S1474-7065\(02\)00050-5](https://doi.org/10.1016/S1474-7065(02)00050-5)
- Galván, L. (2011). *Modelización hidrológica del río Odiel: aplicación al estudio de la contaminación por drenaje ácido de minas*. Huelva, España: Universidad de Huelva.
- 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. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211-1250. <https://doi.org/10.13031/2013.23637>
- Getachew, H. E., & Melesse, A. M. (2012). The impact of land use change on the hydrology of the Angereb watershed, Ethiopia. *International Journal of Water Sciences*, 1(4), 1-7. <https://doi.org/10.5772/56266>

- Godínez, J. (2022). Chapter 3: Unravelling intractable water conflicts: The entanglement of science and politics in decision-making on large hydraulic infrastructure. In: *Paradigm lost: On the value of lost causes in transforming cities and water systems' development pathways* (pp. 43-72). Delft, The Netherlands: IHE Delft Institute for Water Education.
- Goldstein, J., & Tarhule, A. (2015). Evaluating the impacts of climate change and switchgrass production on a semiarid basin. *Hydrological Processes*, 29, 724-738. <https://doi.org/10.1002/hyp.10159>
- González, I. (2023). *Propuesta de punto de acuerdo para que se revise, evalúe, actualice y dé seguimiento al Programa Estatal Hidráulico*. León, México: Congreso del Estado de Guanajuato, Sexagésima Quinta Legislatura.
- Gosain, A. K., Rao, S., & Basuray, D. (2006). Climate change impact assessment on hydrology of Indian river basins. *Current Science*, 90(3), 346-353.
- Hamad, J., Eshtawi, T., Abushaban, A., & Haboub, M. (2012). Modeling the impact of land-use change on water budget of Gaza Strip. *Journal of Water Resource and Protection*, 4(5), 325-333. <https://doi.org/10.4236/jwarp.2012.46036>
- Haro, D., Palazón, L., & Beguería, S. (2020). Long-term sustainability of large water resource systems under climate change: A cascade modeling approach. *Journal of Hydrology*, 582, 124546, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124546>

- Hernández, M., Miller, S., Goodrich, D., Goff, B., Kepner, W., Edmonds, C., & Jones, B. (2000). Modeling runoff response to land cover and rainfall spatial variability in semi-arid watersheds. *Environmental Monitoring and Assessment*, 64, 285-298. https://doi.org/10.1007/978-94-011-4343-1_23
- Huang, S., Krysanova, V., & Hattermann, F. F. (2015). Projections of climate change impacts on floods and droughts in Germany using an ensemble of climate change scenarios. *Regional Environmental Change*, 15(3), 461-473. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0606-z>
- Hunink, J. E., Niadas, I. A., Antonaropoulos, P., Droogers, P., & De Vente, J. (2013). Targeting of intervention areas to reduce reservoir sedimentation in the Tana catchment (Kenya) using SWAT. *Hydrological Sciences Journal*, 58(3), 600-614. <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.774090>
- Huntjens, P., Pahl-Wostl, C., Rihoux, B., Schlüter, M., Flachner, Z., Neto, S., Koskova, R., Dickens, C., & Kiti, I. (2011). Adaptive water management and policy learning in a changing climate: A formal comparative analysis of eight water management regimes in Europe, Africa and Asia. *Environmental Policy and Governance*, 21(3), 145-163. <https://doi.org/10.1002/eet.571>
- Hussain, S., Niyazi, B., Elfeki, A., Masoud, M., Wang, X., & Awais, M. (2024). SWAT-driven exploration of runoff dynamics in hyper-arid region, Saudi Arabia: Implications for hydrological understanding. *Water*, 16(12), 2043. <https://doi.org/10.3390/w16142043>
- Krysanova, V., & White, M. (2015). Advances in water resources assessment with SWAT. An overview. *Hydrological Sciences Journal*, 60(5), 771-783. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1029482>

- Langhoff, L., Geraldi, A., & Rosell, P. (2017). El concepto de ciclo hidrosocial aplicado a los conflictos por el acceso al agua. El caso de la disputa por el río Atuel entre las provincias de La Pampa y Mendoza, Argentina. *Papeles de Geografía*, (63), 146-160. <https://doi.org/10.6018/geografia/2017/280681>
- López-Ballesteros, A., Senent-Aparicio, J., Srinivasan, R., & Pérez-Sánchez, J. (2019). Assessing the impact of best management practices in a highly anthropogenic and ungauged watershed using the SWAT model: A case study in the El Beal watershed (Southeast Spain). *Agronomy*, 9(10), 576. <https://doi.org/10.3390/agronomy9100576>
- Lorz, C., Volk, M., & Schmidt, G. (2007). Considering spatial distribution and functionality of forests in a modeling framework for river basin management. *Forest Ecology and Management*, 248(1-2), 17-25. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.02.032>
- Markhi, A., Laftouhi, N.-E., Grusson, Y., & Soulaïmani, A. (2019). Assessment of potential soil erosion and sediment yield in the semi-arid N'fis basin (High Atlas, Morocco) using the SWAT model. *Acta Geophysica*, 67(1), 263-272. <https://doi.org/10.1007/s11600-019-00251-z>
- Martínez-Casasnovas, J. A., Bonilla, M., & Ramos, M. C. (2012). Multi-temporal analysis of sediment yield caused by hydric erosion in a basin of the Anoia-Penedès vineyard region (NE Spain). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 38(1), 95-114. <https://doi.org/10.18172/cig.1277>

- Milewski, A., Wondwosen, S., Elkadiri, R., & Durham, M. (2020). Multi-scale hydrologic sensitivity to climatic and anthropogenic changes in northern Morocco. *Geosciences*, 10(1), 13. <https://doi.org/10.3390/geosciences10010013>
- Mishra, A., Froebrich, J., & Gassman, P. W. (2007). Evaluation of the SWAT model for assessing sediment control structures in a small watershed in India. *Transactions of the ASABE*, 50(2), 469-477. <https://doi.org/10.13031/2013.22637>
- Morales, A. (2012). *La gestión adaptativa de agua ante un contexto de variabilidad y cambio climático: un enfoque operativo*. Tijuana, México: El Colegio de la Frontera Norte.
- Mosbahi, M., & Benabdallah, S. (2020). Assessment of land management practices on soil erosion using SWAT model in a Tunisian semi-arid catchment. *Journal of Soils and Sediments*, 20(2), 1129-1139. <https://doi.org/10.1007/s11368-019-02443-y>
- Mosbahi, M., Benabdallah, S., & Boussema, M. R. (2013). Assessment of soil erosion risk using SWAT model. *Arabian Journal of Geosciences*, 6(10), 4011-4019. <https://doi.org/10.1007/s12517-012-0658-7>
- Nearing, M. A., Jetten, V., Baffaut, C., Cerdan, O., Couturier, A., Hernandez, M., Le Bissonnais, Y., Nichols, M. H., Nunes, J. P., Renschler, C. S., Souchère, V., & van Oost, K. (2005). Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. *Catena*, 61(2-3), 131-154. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.03.007>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2005). *Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation: Version 2005*. College Station, USA: Texas Water Resources Institute.

- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2009). *Soil and Water Assessment Tool theoretical documentation: Version 2009*. College Station, USA: Texas Water Resources Institute.
- Nieto, N. (2011). La gestión del agua: tensiones globales y latinoamericanas. *Política y Cultura*, (36), 155-176.
- Nsanzabaganwa, J., Chen, X., Liu, T., Hakorimana, E., Mind'je, R., Gasirabo, A., Bakayisire, F., Umugwaneza, A., & Schadrack, N. (2024). Impacts of land use and land cover change on non-point source pollution in the Nyabarongo River catchment, Rwanda. *Water*, 16(17), 3033. <https://doi.org/10.3390/w16213033>
- Nunes, J. P., Seixas, J., & Pacheco, N. R. (2008). Vulnerability of water resources, vegetation productivity and soil erosion to climate change in Mediterranean watersheds. *Hydrological Processes*, 22(16), 3115-3134. <https://doi.org/10.1002/hyp.6897>
- Pacetti, T., Lompi, M., Petri, C., & Caporali, E. (2020). Mining activity impacts on soil erodibility and reservoirs silting: Evaluation of mining decommissioning strategies. *Journal of Hydrology*, 589, 125348, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125107>
- Pahl-Wostl, C. (2007). Transitions towards adaptive management of water facing climate and global change. *Water Resources Management*, 21(1), 49-62. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9040-4>
- Pahl-Wostl, C., & Sendzimir, J. (2005). The relationship between IWRM and adaptive water management. Obtenido de N. *Project, New Approaches to Adaptive Water Management Under Uncertainty* (pp. 1-15). Recuperado de <http://www.newater.uniosnabrueck.de/index.php?pid=1020>

- Panagopoulos, Y., Dimitriou, E., & Skoulikidis, N. (2019). Vulnerability of a Northeast Mediterranean island to soil loss. Can grazing management mitigate erosion? *Water*, 11(8), 1491. <https://doi.org/10.3390/w11071491>
- Pascual, D., López, J., Retana, J., & Terradas, J. (2015). Impacts of climate change on water resources in the Mediterranean Basin: A case study in Catalonia, Spain. *Hydrological Sciences Journal*, 60(12), 2132-2147. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.947290>
- Pisinaras, V., Wei, Y., Barring, L., & Gemitzi, A. (2014). Conceptualizing and assessing the effects of installation and operation of photovoltaic power plants on major hydrologic budget constituents. *Science of the Total Environment*, 493, 239-250. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.05.132>
- Pohle, I., Koch, H., Conradt, T., Gädeke, A., & Grünewald, U. (2015). Potential impacts of climate change and regional anthropogenic activities in Central European mesoscale catchments. *Hydrological Sciences Journal*, 60(5), 912-928. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.968571>
- Quiroz, C. (2020). *Sobreexplotación y gestión de sistemas acuíferos*. Chihuahua, México: Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Ricci, G. F., De Girolamo, A. M., Abdelwahab, O. M., & Gentile, F. (2018). Identifying sediment source areas in a Mediterranean watershed using the SWAT model. *Land Degradation & Development*, 29(4), 1233-1248. <https://doi.org/10.1002/ldr.2889>

- Rodríguez-Blanco, M. L., Arias, R., Taboada-Castro, M. M., Nunes, J. P., Keizer, J. J., & Taboada-Castro, M. T. (2016). Potential impact of climate change on suspended sediment yield in NW Spain: A case study on the Corbeira catchment. *Water*, 8(10), 444. <https://doi.org/10.3390/w8100444>
- Rosenberg, N. J., Epstein, D. J., Wang, D., Vail, L., Srinivasan, R., & Arnold, J. G. (1999). Possible impacts of global warming on the hydrology of the Ogallala aquifer region. *Climatic Change*, 42(4), 677-692. <https://doi.org/10.1023/A:1005424003553>
- Schmalz, B., Zhang, Q., Kuemmerlen, M., Cai, Q., Jähnig, S. C., & Fohrer, N. (2015). Modelling spatial distribution of surface runoff and sediment yield in a Chinese river basin without continuous sediment monitoring. *Hydrological Sciences Journal*, 60(5), 817-830. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.967245>
- Sharpley, A. N., Daniel, T. C., Gibson, G., Bundy, L. G., Cabrera, M. L., Sims, J. T., Stevens, R., Lemunyon, J., Kleinman, P., & Parry, R. (2006). *Best management practices to minimize agricultural phosphorus impacts on water quality*. Washington, DC, USA: Agricultural Research Service of the United States Department of Agriculture (USDA-ARS).
- Sood, A., Muthuwatta, L., & McCartney, M. (2013). A SWAT evaluation of the effect of climate change on the hydrology of the Volta River basin. *Water International*, 38(3), 297-311. <https://doi.org/10.1080/02508060.2013.792404>

- Srinivasan, R., Ramanarayanan, T. S., Arnold, J. G., & Bednarz, S. T. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part II: Model application. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 91-101. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05962.x>
- Stefanova, A., Krysanova, V., Hesse, C., & Lillebø, A. I. (2015). Climate change impact assessment on water inflow to a coastal lagoon: The Ria de Aveiro watershed, Portugal. *Hydrological Sciences Journal*, 60(5), 929-948. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.983518>
- Strauch, M., Lima, J. E. F. W., Volk, M., Lorz, C., & Makeschin, F. (2013). The impact of Best Management Practices on simulated streamflow and sediment load in a Central Brazilian catchment. *Journal of Environmental Management*, 127, S24-S36. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.01.014>
- Sun, H., & Cornish, P. S. (2005). Estimating shallow groundwater recharge in the headwaters of the Liverpool Plains using SWAT. *Hydrological Processes*, 19(3), 795-807. <https://doi.org/10.1002/hyp.5617>
- Suwannachai, L., Sriworamas, K., Sivanpheng, O., & Kangrang, A. (2024). Application of SWAT model for assessment of surface runoff in flash flood areas. *Water*, 16(3), 495. <https://doi.org/10.3390/w16030495>
- Tan, M. L., Ibrahim, A. L., Yusop, Z., Duan, Z., & Ling, L. (2015). Impacts of land-use and climate variability on hydrological components in the Johor River basin, Malaysia. *Hydrological Sciences Journal*, 60(5), 873-889. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.967246>

- Tang, Z., Wang, Y., & Chen, W. (2024). Assessment and application of multi-source precipitation products in cold regions based on the improved SWAT model. *Remote Sensing*, 16(24), 4132. <https://doi.org/10.3390/rs16224132>
- Tripathi, M. P., Panda, R. K., & Raghuwanshi, N. S. (2003). Identification and prioritisation of critical sub-watersheds for soil conservation management using the SWAT model. *Biosystems Engineering*, 85(3), 365-379. [https://doi.org/10.1016/S1537-5110\(03\)00066-7](https://doi.org/10.1016/S1537-5110(03)00066-7)
- Uribe, N. (2010). *SWAT (Soil and Water Assessment Tool): Conceptos básicos y guía rápida para el usuario. Versión SWAT 2005*. Palmira, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical.
- Vaché, K. B., Eilers, J. M., & Santelmann, M. V. (2002). Water quality modeling of alternative agricultural scenarios in the U.S. corn belt. *Journal of the American Water Resources Association*, 38(3), 773-787. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2002.tb00996.x>
- Valencia, S., Villegas, J. C., Hoyos, N., Duque-Villegas, M., & Salazar, J. F. (2024). Streamflow response to land use/land cover change in the tropical Andes using multiple SWAT model variants. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 54, 101888, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2024.101888>
- Varanou, E., Gkouvatsou, E., Baltas, E., & Mimikou, M. (2002). Quantity and quality integrated catchment modeling under climate change with use of Soil and Water Assessment Tool model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 7(3), 228-244. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2002\)7:3\(228\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2002)7:3(228))

- Wang, R., Kalin, L., Kuang, W., & Tian, H. (2014). Individual and combined effects of land use/cover and climate change on Wolf Bay watershed streamflow in southern Alabama. *Hydrological Processes*, 28(22), 5530-5546. <https://doi.org/10.1002/hyp.10057>
- Weber, A., Fohrer, N., & Möller, D. (2001). Long-term land use changes in a mesoscale watershed due to socio-economic factors. Effects on landscape structures and functions. *Ecological Modelling*, 140(1-2), 125-140. [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(01\)00261-7](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(01)00261-7)
- Williams, J. R. (1975). Sediment routing for agricultural watersheds. *Water Resources Bulletin*, 11(5), 965-974. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1975.tb01817.x>
- Wu, Y., Liu, S., Sohl, T. L., & Young, C. J. (2013). Projecting the land cover change and its environmental impacts in the Cedar River Basin in the Midwestern United States. *Environmental Research Letters*, 8(2), 024025, 1-13. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/2/024025>
- Xu, Y., Fu, B., & He, C. (2013). Assessing the hydrological effect of the check dams in the Loess Plateau, China, by model simulations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(6), 2185-2193. <https://doi.org/10.5194/hess-17-2185-2013>