

Modelación hidrológica con el modelo SWAT empleando diferentes distribuciones espaciales del tipo suelo en la cuenca del Río Mixteco
Hydrological modeling with the SWAT model using different spatial distributions of soil type in the Mixteco River Basin

Gerardo Colín-García¹ , Enrique Palacios-Vélez¹ , Demetrio S. Fernández-Reynoso¹ , Adolfo López-Pérez^{1†} , Héctor Flores-Magdaleno¹ , Roberto Ascencio-Hernández¹  y Enrique I. Canales-Islas² 

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo. 56230 Texcoco, Estado de México, México.

[†] Autor para correspondencia (adolfohp@colpos.mx)

² Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, Campo Experimental Santiago Ixcuintla. Carretera Internacional México-Nogales, km. 6, Centro. 63300 Santiago Ixcuintla, Nayarit, México.

Editor de Sección: Dr. Gabriel Rincón Enríquez

RESUMEN

La cuenca del río Mixteco se ubica en el estado de Oaxaca, México y comprende una superficie total de 6 559.20 km²; esta presenta fuerte degradación de sus recursos naturales, derivado principalmente de las acciones antrópicas asociadas a una mala administración de sus recursos naturales. El objetivo de este trabajo fue evaluar el comportamiento del escurrimiento superficial mediante el modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) en la cuenca del río Mixteco utilizando tanto la distribución espacial de suelo del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) como la obtenida a través de la técnica de DSM (Mapeo Digital de Suelos). La modelación con INEGI (ModINEGI) correspondió al mapa edafológico de la Serie II escala 1:250,000 y la modelación con DSM (ModDSM) se obtuvo a partir de covariables ambientales. Los indicadores de evaluación del desempeño del modelo SWAT durante la fase de calibración fueron $R^2 = 0.88$ y $NSE = 0.87$ para ModDSM y $R^2 = 0.85$ y $NSE = 0.85$ para ModINEGI; sin embargo, durante el periodo de validación, los resultados de ModDSM ($R^2 = 0.83$ y $NSE = 0.81$) fueron mejores que los de ModINEGI ($R^2 = 0.83$ y $NSE = 0.61$). Por lo tanto, los resultados indican que la variación espacial de los tipos de suelo obtenida a través de la técnica de DSM, en combinación con la cobertura vegetal y la distribución de las pendientes a nivel cuenca, permiten al modelo SWAT simular de forma adecuada el comportamiento del escurrimiento superficial.

Palabras clave: *área de drenaje, balance hídrico, mapeo digital de suelos, producción de escurrimientos.*



Cita recomendada:

Colín-García, G., Palacios-Vélez, E., Fernández-Reynoso, D. S., López-Pérez, A., Flores-Magdaleno, H., Ascencio-Hernández, R., & Canales-Islas, E. (2023). Modelación hidrológica con el modelo SWAT empleando diferentes distribuciones espaciales del tipo suelo en la cuenca del río Mixteco. *Terra Latinoamericana*, 41, 1-15 e1566. <https://doi.org/10.28940/terra.v41i0.1566>

Recibido: 10 de mayo de 2022.
 Aceptado: 7 de diciembre de 2022.
 Artículo. Volumen 41.
 Febrero de 2023.

SUMMARY

The Mixteco River basin is located in the state of Oaxaca, Mexico and comprises a total area of 6 559.20 km², which shows a strong degradation of its natural resources, derived mainly from anthropic actions associated with poor management of its natural resources. Thus, the goal of this research is to evaluate the runoff behavior with the SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) model in the Mixteco River basin using the soil spatial distribution from INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) and that obtained through technique of DSM (*Digital Soil Mapping*) technique. The modeling with INEGI (ModINEGI) corresponds to the soil map of the series II scale 1:250 000, and the modeling with DSM (ModDSM) was obtained from the environmental covariates. The SWAT model performance evaluation indicators during the calibration phase were $R^2 = 0.88$ and $NSE = 0.87$ for ModDSM and $R^2 = 0.85$

and NSE = 0.85 for ModINEGI. However, during the validation period, the ModDSM results ($R^2 = 0.83$ and NSE = 0.81) were better than those of ModINEGI ($R^2 = 0.83$ and NSE = 0.61). Therefore, the results indicate that the spatial variation of the soil types obtained through the DSM technique in combination with the vegetation cover and the distribution of slopes at the basin level, allow the SWAT model to simulate the adequate surface runoff behavior.

Index words: *drainage area, water balance, digital soil mapping, runoff yield.*

INTRODUCCIÓN

La modelación hidrológica es una herramienta eficaz que permite observar el comportamiento de los diferentes procesos que ocurren dentro de una cuenca, donde es conformada por la distribución espacial de la lluvia y la producción de escurrimientos (De Andrade y Ribeiro, 2020); actualmente ésta desempeña un papel trascendental en la administración de los recursos hídricos y con base en su aplicación, se toman diversas decisiones para un manejo adecuado (Zhao *et al.*, 2018).

Sin embargo, la escasez de datos representa una seria limitante para la modelación hidrológica e influye en la toma de decisiones, debido a que puede llevar a la aplicación de medidas inapropiadas en el manejo de los recursos hídricos, cuando se omite el uso de la información del tipo de suelo y su distribución espacial (Tavares-Wahren *et al.*, 2016). El tipo de suelo interviene como un control de primer orden en los procesos hidrológicos, al separar la lluvia en escurrimiento superficial e infiltración. Por ejemplo, el movimiento del agua en el suelo, está determinado principalmente por las propiedades del tipo de suelo y su distribución espacial. No obstante, la información existente, fue generada principalmente con fines agrícolas, lo que puede conllevar a una aplicación incorrecta en la modelación hidrológica y de los valores en los parámetros del suelo usados para su calibración (van Zijl, van Tol, Tinnefeld y le Roux, 2019).

Actualmente se ha desarrollado el Mapeo Digital de Suelos (DSM), como una herramienta eficaz implementada con algoritmos complejos. Utiliza el procesamiento de grandes bases de datos, para la obtención de información precisa y la creación de mapas de alta resolución espacial (Droz *et al.*, 2021; McBratney, Odeh, Bishop, Dunbar y Shatar, 2000; McBratney, Mendonça-Santos y Minasny, 2003; Zhu y Scott, 2001). De esta forma, el desarrollo de la técnica de DSM ha permitido representar de mejor manera la distribución espacial del tipo de suelo y sus propiedades a escala de cuenca (Bugaets *et al.*, 2021), en la cual, los suelos tienen una alta influencia en función de su variabilidad.

El modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) es un modelo hidrológico semi-distribuido, físicamente basado, que permite representar los componentes del balance hídrico; además, opera con el paso diario del tiempo y está diseñado para pronosticar el efecto que las prácticas de manejo del suelo tienen sobre la producción de escurrimientos, sedimentos; así como el impacto de los fertilizantes en grandes cuencas complejas con diferentes tipos de suelo, cobertura vegetal y condiciones de manejo por tiempos prolongados (Arnold, Srinivasan, Muttiah y Williams 1998; Weber y Baigorri, 2018). Para realizar esta modelación en la cuenca, el modelo SWAT requiere datos de clima, la distribución espacial del tipo de suelo, propiedades físicas y químicas, el relieve, la cobertura vegetal y las prácticas de manejo del suelo (Neitsch, Arnold, Kiniry y Williams, 2011). El modelo SWAT se calibra con datos de producción de escurrimientos y sedimentos, además existen investigaciones que utilizan parámetros relacionados con las pérdidas de suelo en laderas (Arnold *et al.*, 2012; Roth, Nigussie y Lemann, 2016; Zuo *et al.*, 2016).

El desempeño del modelo hidrológico SWAT ha mejorado notablemente utilizando diferentes fuentes de datos de tipo de suelo, confirmando que la resolución espacial es esencial para la definición de las subcuencas y configuración del modelo; debido a que el tipo de suelo es un factor clave para la modelación hidrológica (Romanowicz, Vancllooster, Rounsevell y La Junesse, 2005). Las fuentes de información, escala y distribución espacial de las propiedades son diversas, lo que ha llevado a aumento en la producción de mapas mediante diferentes técnicas como DSM, debido a que, en comparación con el levantamiento de suelos tradicional, realizado por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), el DSM es más rápido y económico ya que requiere de menos planeación, intensidad de muestreo, análisis de laboratorio y procesamiento de datos (Abarca y Bernabé-Poveda, 2010; Kateb, Bouchelkia, Benmansour y Belarbi, 2019; Rivas-Tabares, de Miguel, Willaarts y Tarquis 2020; Tavares-Wahren *et al.*, 2016).

El objetivo de esta investigación consistió en evaluar el comportamiento del modelo hidrológico SWAT en la cuenca del río Mixteco mediante la comparación del escurrimiento superficial en función de la distribución espacial del tipo suelo de INEGI y la obtenida a través de la técnica de DSM.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de Estudio

La cuenca del río Mixteco se localiza en el noroeste del estado de Oaxaca, cubriendo una superficie total de 6 559.20 km² (Figura 1). De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), esta cuenca forma parte de la Región Hidrológica del Río Balsas (RH18) (CONAGUA, 2020), su cauce principal es el río Mixteco que se origina de la unión de los ríos Tlaxiaco y Juxtlahuaca. La delimitación se realizó a partir de la Estación Hidrométrica Mariscal (EHM) en las coordenadas geográficas 17° 51' 45" N y 98° 08' 58" O a 2 013 m de altitud.

La cuenca se encuentra dentro de cuatro subprovincias fisiográficas: Mixteca Alta (54.83%), Cordillera Costera del Sur (38.04%), Sierras Centrales de Oaxaca (5.87%) y Sierras del Sur de Puebla (1.26%) (INEGI, 2001).



Figura 1. Localización de la cuenca del río Mixteco, Oaxaca, México.
Figure 1. Location of the Mixteco River basin, Oaxaca, Mexico.

Marco Conceptual del Modelo Hidrológico SWAT

El modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) es un modelo hidrológico semi-distribuido, físicamente basado, que permite simular los componentes del balance hídrico (Ecuación 1), en escala espacial y temporal. Se clasifica como continuo, debido a que opera en el paso diario de tiempo y está diseñado para predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo en la generación de escurrimientos, sedimentos; así como del comportamiento de sustancias agrícolas químicas en cuencas complejas con diferentes tipos de suelo, cobertura vegetal y condiciones de manejo en tiempos prolongados (meses o años) (Arnold *et al.*, 1998; Weber y Baigorri, 2018).

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

Donde: SW_t , es el contenido final de agua en el suelo (mm) en el tiempo t ; SW_0 , es el contenido inicial de agua del suelo en el día i (mm); t , es el tiempo (días); R_{day} , es la cantidad de precipitación en un día i (mm); Q_{surf} , es la cantidad de escurrimiento superficial en un día i (mm); E_a , es la cantidad de evapotranspiración en el día i (mm); W_{seep} , es la cantidad de agua que percola en el perfil del suelo en un día i (mm) y Q_{gw} es la cantidad de flujo de retorno en un día i (mm).

El procedimiento consiste en dividir la cuenca de estudio en múltiples subcuencas con base en el Modelo Digital de Elevaciones (MDE), posteriormente se subdividen en Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) de acuerdo a la pendiente del terreno, tipo de suelo y cobertura vegetal. Esta subdivisión permite a SWAT representar las diferencias en la evapotranspiración para varios ciclos de cultivo y tipos de suelo. Los escurrimientos son estimados de forma separada para cada HRU y orientados para obtener los escurrimientos totales para la cuenca, con lo cual aumenta la certeza y describe de mejor manera el balance hídrico (Neitsch *et al.*, 2011).

El modelo SWAT utiliza la información de la estación meteorológica más cercana al centroide de cada subcuenca. El ciclo hidrológico es simulado para cada HRU en función del balance hídrico, que incluye la precipitación, interceptación, escurrimiento superficial, evapotranspiración, percolación, flujo lateral del perfil del suelo y flujo de retorno de acuíferos poco profundos (Gassman, Reyes, Green y Arnold, 2007). El escurrimiento superficial lo predice en forma separada para cada HRU y, posteriormente se concentra a través del método del Número de Curva (CN) del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) para obtener el escurrimiento total de la cuenca (USDA, 1972). La modelación del movimiento vertical del agua se realiza con el método de infiltración de Green y Ampt (Green y Ampt, 1911). El perfil del suelo se subdivide en múltiples capas a través de un modelo de almacenamiento cinemático para calcular la redistribución del agua entre las capas del suelo (Sloan y Moore, 1984). El agua en el perfil de suelo puede moverse lateralmente y contribuir al flujo lateral hacia los canales de drenaje e infiltrarse en acuíferos poco profundos donde se convierte en flujo de retorno o en acuíferos profundos (Gassman *et al.*, 2007; Neitsch *et al.*, 2011).

El modelo SWAT calcula la evaporación del suelo y las plantas por separado. La evapotranspiración potencial (ETP) puede obtenerse con los métodos de Penman-Monteith (Monteith, 1965), Priestley-Taylor (Priestley y Taylor, 1972) o Hargreaves (Hargreaves y Samani, 1985), con base en la disponibilidad de datos. La evaporación potencial del agua del suelo se estima en función de la ETP y el índice de área foliar (LAI). La evaporación real del suelo se estima a través de funciones exponenciales de profundidad del suelo y contenido de agua. La cantidad de agua que es transpirada por la planta se simula como una función lineal de la ETP, el LAI y la profundidad

de la raíz, y puede estar limitada por el contenido de agua del suelo y por sus características físicas (Arnold *et al.*, 1998). El modelo SWAT se ejecutó en el software QSWAT3 dentro del programa de uso libre QGIS versión 3.16.8 (QGIS Org, 2021).

Datos de Entrada

El modelo SWAT requiere múltiples conjuntos de datos de entrada para su ejecución, como son: Modelo Digital de Elevaciones (MDE), cobertura vegetal, tipo de suelo, información climática e hidrométrica.

Modelo Digital de Elevaciones

El Modelo Digital de Elevaciones (MDE), se usa para delimitar la cuenca y las subcuencas, la creación de la red de drenaje y para el cálculo de la pendiente. En esta investigación se usó un MDE con una resolución espacial de 15 m, obtenido de la página oficial de INEGI (INEGI, 2012), Figura 2.

Cobertura Vegetal

La distribución espacial de la cobertura vegetal para el periodo de calibración y validación, se obtuvo del conjunto de datos vectoriales de la carta de uso de suelo y vegetación de la serie IV, en escala 1:250 000, para la cuenca del río Mixteco (INEGI, 2009). En la Figura 3, se puede observar que la mayor parte de la cuenca está cubierta por algún tipo de bosque ocupando 44.95%; el más representativo es: Encino (BENC), seguido de Pino-Encino (ENPI), Pino (PINO), Encino-Pino (ENPI), Táscate (BTAS) y Mesófilo de Montaña (BOMM); las otras coberturas son Pastizal Inducido (PASI, 21.85%) , Agricultura de Temporal (TEMP, 19.02%), Selva Baja Caducifolia (SEBC, 10.06%) y el área restante, que es una superficie muy pequeña (4.12%), está cubierta por Agricultura de Riego (RIEG), Matorrales (MATO), Palmar Inducido (PALM), Cuerpos de Agua (AGUA) y Zona Urbana de baja y media densidad (URLD y URMD).

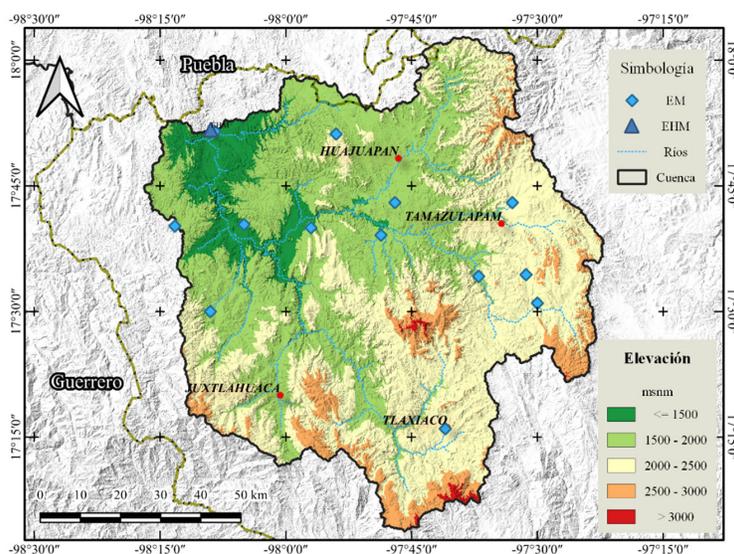


Figura 2. Localización de las estaciones meteorológicas (EM), estación hidrométrica Mariscala (EHM) y distribución espacial de las elevaciones en la cuenca del río Mixteco.

Figure 2. Location of the meteorological stations (EM), Mariscala hydrometric station (EHM), and spatial elevation distribution in the Mixteco River basin.

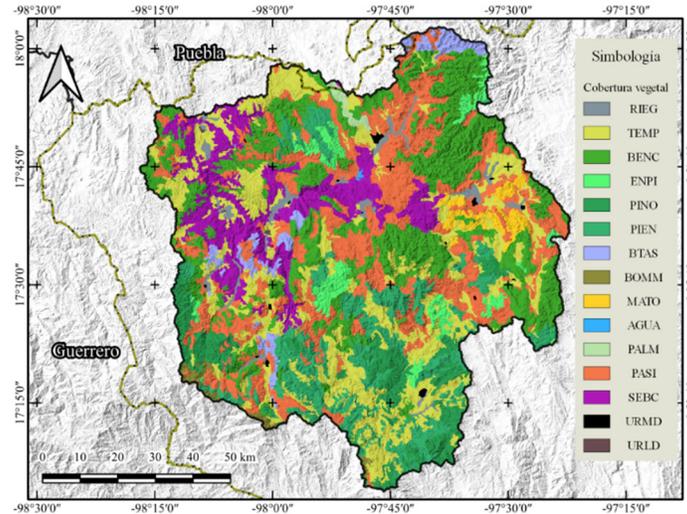


Figura 3. Uso del suelo y vegetación de la cuenca del río Mixteco.
Figure 3. Land-use/landcover of the Mixteco River basin.

Tipo de Suelo

Durante la implementación del modelo SWAT se utilizaron dos fuentes de datos para la distribución espacial del tipo de suelo y sus propiedades. El primero fue la distribución espacial de los tipos de suelo reportados por INEGI, en la Serie II en escala 1:250 000 (INEGI, 2007); el segundo, fue el mapa de unidades de suelo generado por Colín-García *et al.* (2017) a través de covariables ambientales mediante la técnica de Mapeo Digital de Suelos (DSM) con precisión global de 76.67% y coeficiente kappa de 71.20%; ambos utilizan la Base Referencial Mundial del Recurso Suelo (WRB) de la FAO para su clasificación.

En la distribución espacial con base en la Serie II del INEGI, los Leptosoles cubren la mayor parte de la cuenca con 46.42%, seguido de Regosoles (18.79%), Phaeozems (11.28%), Vertisoles (9.71%) y Cambisoles (6.98%), en el área restante existe la presencia Fluvisoles, Calcisoles y Luvisoles, ocupando 6.81% (Figura 4a). Por otra parte, el mapa de unidades de suelo obtenido a través de las técnicas del DSM se identificaron los grupos de suelos Leptosoles con 48.25%, seguido de los Cambisoles (35.80%), Regosoles (8.00%), Fluvisoles (7.16%) y Vertisoles (0.79%) (Figura 4b).

Información Climatológica e Hidrométrica

La información climatológica de entrada para el modelo SWAT se obtuvo de la Base de Datos Climatológica Nacional (Sistema CLICOM), para un total de 13 estaciones meteorológicas (EM), ubicadas en la cuenca del río Mixteco (Figura 2), con un porcentaje mayor a 80% de registro. Para la estimación de datos faltantes de la serie histórica se utilizó el programa *ClimGen*, el cual es un modelo estocástico de paso de tiempo diario para determinar series de datos de variables como precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima, radiación solar, humedad relativa y velocidad de viento, cuyos estadísticos resultan similares a los datos climáticos históricos (Tingem, Rivington, Azam-Ali y Colls, 2007). Posteriormente, se obtuvieron los parámetros estadísticos medios mensuales necesarios para generar la distribución diaria de los datos climáticos representativos de las subcuencas que requiere el generador climático del modelo SWAT.

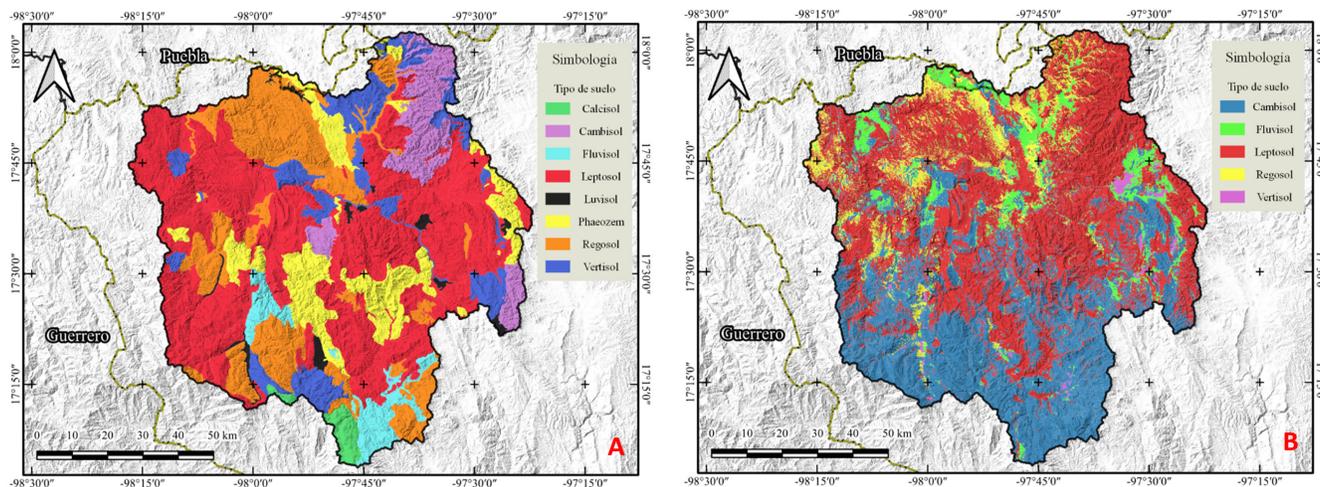


Figura 4. Distribución espacial del tipo de suelo de la cuenca del río Mixteco. (a) Con base en la Serie II de INEGI; (b) Con base en la técnica de DSM.

Figure 4. Spatial distribution of soil type in the Mixteco River basin. (a) Based on INEGI Series II; (b) Based on DSM technique.

Los aforos mensuales de producción de escurrimientos para la Estación Hidrométrica Mariscal (EHM) se adquirieron del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (CONAGUA, 2012) para el periodo de registro de 1972 a 1980.

Delimitación de las Subcuencas

La cuenca del río Mixteco se dividió en 79 subcuencas, tomando en consideración una acumulación de flujo de 50 km². Para la definición de las HRU se le asignó 5% al valor del umbral en la combinación de las capas temáticas de cobertura vegetal, tipo de suelo y pendiente del terreno; esta última capa definida en dos intervalos (menor a 5% y mayor de 5%). Primero se ejecutó el modelo SWAT con base en la distribución espacial del tipo suelo de INEGI (ModINEGI) y después con el mapa de unidades de suelo generado por Colín-García *et al.* (2017) a través de la técnica de DSM (ModDSM); obteniendo un total de 896 HRU y 1239 HRU, respectivamente.

Calibración y Validación

Para la modelación hidrológica se establecieron los años 1970 y 1971 como etapa de precalentamiento del modelo SWAT, particularmente para la estimación del contenido de humedad inicial del suelo.

La calibración se puede definir como el proceso de estimación de valores de los parámetros que reducen los errores entre los datos observados y simulados por el modelo SWAT (Ercan, Goodall, Castronova, Humphrey y Beekwilder, 2014), con la finalidad de disminuir las incertidumbres causadas por variaciones en los parámetros. Se han desarrollado varias técnicas de calibración para el modelo SWAT, incluidos los procedimientos de calibración manual y automatizados que utilizan el método de evolución compleja mezclada y otros métodos comunes (Reddy, Reddy, Vani, Daggupati y Srinivasan, 2018). La calibración del modelo SWAT requiere la optimización de varios parámetros para garantizar una representación detallada de los procesos que suceden en una cuenca (Ha, Bastiaanssen, van Griensven, van Dijk y Senay, 2018). Este proceso consistió en la calibración de la producción de biomasa anual y la producción de escurrimientos a nivel mensual.

La calibración de la producción de biomasa se realizó de forma manual para la cobertura vegetal de la cuenca, considerando los valores de conversión de energía a biomasa (BIO_E), índice de cosecha (HVSTI), índice de área foliar máximo (BLAI), índice de área foliar mínimo (ALAI_MIN), temperatura base para el crecimiento de las plantas (T_BASE) y unidades calor (PHU_PLT) (López-Ramírez *et al.*, 2021).

Posteriormente, se utilizó el programa SWAT-CUP, el cual proporciona un marco de toma de decisiones e incorpora un enfoque semiautomático, para el análisis de sensibilidad, calibración, validación y de incertidumbre; además, incluye cuatro algoritmos: Ajuste de Incertidumbre Secuencial (SUFI-2), Probabilidad de Incertidumbre Generalizada (GLUE), Solución de Parámetros (ParaSol) y los Métodos de Inferencia Bayesiana (MCMC) (Abbaspour, Vejdani, Haghghat y Yang, 2007¹). En términos generales, se recomienda un buen conocimiento de los procesos hidrológicos y de la sensibilidad de los parámetros (Arnold *et al.*, 2012).

Para la calibración de la producción de escurrimientos se estableció un conjunto de parámetros (Cuadro 1) que están asociados a procesos como: producción de escurrimientos, flujo de agua subterránea, definición de las HRU y tipo de suelo (Rivas-Tabares *et al.*, 2020), a través del algoritmo SUFI-2 del programa SWAT-CUP se

Cuadro 1. Parámetros de calibración del modelo (SWAT) para la producción de escurrimientos.
Table 1. The soil and water assessment tool (SWAT) model calibration parameters for runoff production.

Parámetro	Descripción	Unidad	LI	LS	Método de variación
ALPHA_BF	Constante de recesión de flujo base	días	0	1	Reemplazar
ALPHA_BNK	Constante de recesión de flujo de banco	días	0	1	Reemplazar
CH_K1	Conductividad hidráulica efectiva en canales tributarios aluviales	mm h ⁻¹	0	300	Reemplazar
CH_K2	Conductividad hidráulica eficaz en los canales principales de aluvión	Adim	5	130	Reemplazar
CN2	Numero de Curva método SCS	Adim	-15	15	Añadir
DEP_IMP	Profundidad hacia la capa impermeable	mm	0	6000	Reemplazar
EPCO	Factor de compensación de la absorción de agua de la vegetación	Adim	0	1	Reemplazar
ESCO	Coefficiente de compensación de la evaporación del suelo	Adim	0	1	Reemplazar
GW_DELAY	Retraso del agua subterránea	días	0	500	Reemplazar
GW_REVAP	Coefficiente de reevaporación del agua subterránea	mm	0.02	0.2	Reemplazar
GWQMN	Nivel de agua umbral en un acuífero poco profundo para flujo base	mm	0	5000	Reemplazar
HRU_SLP	Pendiente media	Adim	-20%	20%	Multiplicar
LAT_TTIME	Tiempo de viaje de flujo lateral	días	0	180	Reemplazar
RCHRG_DP	Fracción de percolación del acuífero poco profundo	Adim	0	1	Reemplazar
SLSOIL	Longitud de pendiente para flujo subsuperficial lateral	m	-10%	10%	Multiplicar
SLSUBBSN	Longitud media de la pendiente	m	-30%	30%	Multiplicar
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible de la capa de suelo	mm mm ⁻¹	-35%	35%	Multiplicar
SOL_K	Conductividad hidráulica saturada	mm h ⁻¹	-90%	90%	Multiplicar
SOL_Z	Profundidad desde la superficie del suelo hasta el fondo de la capa	mm	-35%	35%	Multiplicar
SURLAG	Coefficiente de retraso de escurrimiento superficial	Adim	0	10	Reemplazar

LI = Límite Inferior; LS = Límite Superior; Adim = Adimensional.
LI = Lower Limit; LS = Upper Limit; Adim = Dimensionless.

¹ Abbaspour, K. C., Vejdani, M., Haghghat, S., & Yang, J. (2007). SWAT-CUP calibration and uncertainty programs for SWAT. *MODSIM 2007 International Congress on Modelling and Simulation, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand*. (pp. 1596-1602). Dübendorf, Switzerland: Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology.

realizaron múltiples simulaciones hasta la obtención de un ajuste satisfactorio entre los datos de gasto observado y simulado a nivel mensual durante el periodo de 1972 a 1976. Para la actualización de los parámetros se realizaron de tres formas: reemplazándolos por un valor dado; adicionando al valor del parámetro existente; o relativo cuando el valor de un parámetro existente se multiplica por un valor (Arnold et al., 2012). Además, se obtuvo el análisis de sensibilidad de los parámetros para la identificación del nivel de impacto que tienen en la producción de escurrimientos.

Por último, la validación del modelo consistió en determinar el nivel de precisión de la producción de escurrimientos durante el periodo de 1977 a 1980, sin efectuar algún ajuste adicional de parámetros, utilizando la relación entre en los datos de gasto observado y simulado a nivel mensual.

Indicadores de Evaluación

Para la evaluación del desempeño del modelo SWAT, se seleccionaron tres funciones objetivo Coeficiente de Determinación (R^2), Índice de Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y Sesgo Porcentual (PBIAS) que son ampliamente utilizadas en la modelación hidrológica (Panda, Das, Sahoo, Panigrahi y Singh, 2021); calculados a partir de las Ecuaciones 2, 3 y 4; en el Cuadro 2 se muestra la clasificación de desempeño.

$$R^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})]^2}{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 \sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (2)$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (3)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)}{\sum_{i=1}^n O_i} \times 100 \quad (4)$$

Donde: O_i , son los datos observados del i-ésimo mes ($m^3 s^{-1}$); S_i , son los valores simulados del i-ésimo mes ($m^3 s^{-1}$); \bar{O} , es la media de los datos observados ($m^3 s^{-1}$); \bar{S} , es la media de los valores simulados ($m^3 s^{-1}$) y n , es el número total de datos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Producción de Biomasa

La calibración de la producción de biomasa se presenta en el Cuadro 3, la cual se realizó para un periodo de 9 años (1972-1980) y se obtuvo un ajuste bueno, debido

Cuadro 2. Clasificación de los indicadores de evaluación de desempeño para la modelización hidrológica de acuerdo con Moriasi et al. (2007).

Table 2. Classification of hydrological modeling performance evaluation indicators according to Moriasi et al. (2007).

Clasificación	R^2	NSE	PBIAS
Muy bueno	$R^2 > 0.85$	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$
Bueno	$0.80 \leq R^2 < 0.85$	$0.65 < NSE < 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$
Satisfactorio	$0.70 \leq R^2 < 0.80$	$0.50 < NSE < 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$
No satisfactorio	$R^2 \leq 0.70$	$NSE \leq 0.50$	$PBIAS \geq \pm 25$

a que los valores de biomasa simulados por el modelo se encuentran dentro de los intervalos reportados previamente por Salas-Martínez, Ibáñez, Arteaga, Martínez y Fernández (2014), tanto para la ModINEGI y la ModDSM.

Para la producción anual de biomasa se obtuvo un coeficiente de determinación (R^2) de 0.99 y valor de NSE de 0.98 usando la ModDSM; mientras que, para la ModINEGI, se obtuvo valor de 0.97 para ambos indicadores de evaluación. Por lo tanto, ambas calibraciones muestran buen comportamiento en la estimación de la producción de biomasa.

Análisis de Sensibilidad, Calibración y Validación

El análisis de sensibilidad, para ambas modelaciones, considera como parámetros más sensibles: la conductividad hidráulica saturada (SOL_K) y la fracción de percolación hacia el acuífero poco profundo (RCHRG_DP). Particularmente la ModINEGI agrega la profundidad hacia la capa impermeable (DEP_IMP), la profundidad desde la superficie del suelo hasta el fondo de la capa (SOL_Z) y la conductividad hidráulica eficaz en los canales principales de aluvión (CH_K2), mientras la ModDSM agrega el tiempo de viaje recorrido del flujo lateral (LAT_TTIME), la pendiente media (HRU_SLP) y el número de curva según el método del SCS (CN2).

Durante el periodo de calibración, el gasto simulado utilizando ambas modelaciones, generó hidrogramas similares al gasto observado (Figura 5); la pendiente de la recta indica una subestimación global sobre los datos medidos de 10.42% para la ModINEGI y 22.26% para la ModDSM (Figura 6a). En cambio, durante el periodo de validación el gasto simulado utilizando ModDSM representó de mejor forma el hidrograma comparado con el gasto medio mensual observado; la pendiente de la recta indica sobreestimación global sobre los datos medidos de 20.57% para la ModINEGI y 0.09% para la ModDSM (Figura 6b).

En el Cuadro 4 se despliegan los indicadores de evaluación, donde se observa que ambas modelaciones proporcionaron una adecuada predicción del comportamiento

Cuadro 3. Producción de biomasa anual para la cuenca del río Mixteco.
Table 3. Annual biomass production for the Mixteco River basin.

Clave	Cobertura vegetal	Biomasa				
		Mínimo	Biomasa	Máximo	ModINEGI	ModDSM
----- Mg MS ha ⁻¹ año ⁻¹ -----						
BENC	Bosque de encino	10	11	12	11.24	11.48
ENPI	Bosque de encino-pino	11	12	13	12.50	12.55
SEBC	Selva baja caducifolia	5	7	9	6.68	7.1
BOMM	Bosque mesófilo de montaña	14	16	18	15.58	16.37
MATO	Chaparral	5	6	7	6.38	6.53
PALM	Palmar inducido	6	7	8	6.19	7.57
PASI	Pastizal inducido	3	4	5	3.35	3
PIEN	Bosque de pino-encino	12	13	14	13.45	13.45
PINO	Bosque de pino	13	14	15	12.92	14.08
RIEG	Agricultura de riego	7	8.5	10	7.27	8.66
BTAS	Bosque de táscate	8	9	10	9.59	8.45
TEMP	Agricultura de temporal	3	4.5	6	4.45	4.54

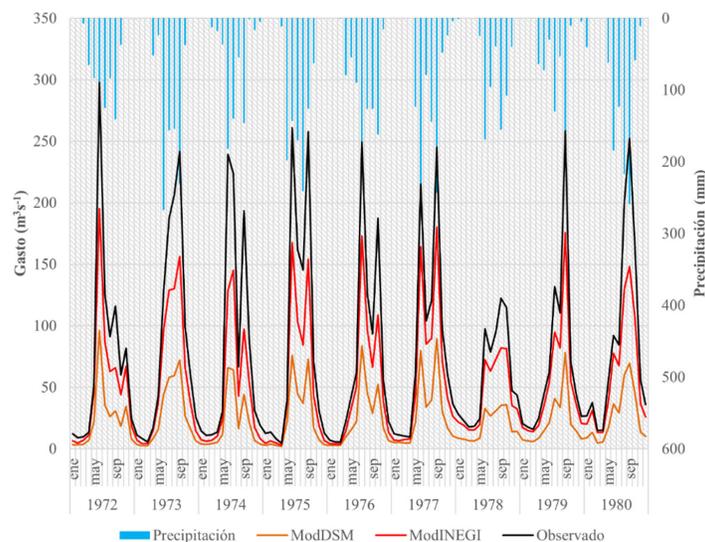


Figura 5. Precipitación y gasto observado y simulado mensual por el modelo SWAT en la cuenca del río Mixteco.

Figure 5. Precipitation and streamflow observed and simulated monthly by the SWAT model of the Mixteco River basin.

del ciclo hidrológico durante el periodo de calibración; sin embargo, durante el periodo de validación la ModDSM mostró una buena estimación del escurrimiento superficial de la cuenca (Moriasi *et al.*, 2007).

En la modelación hidrológica las HRU homogéneas representan de mejor forma los resultados (Tanksali y Soraganvi, 2021), por su parte la ModDSM utilizó 1239 HRU mientras que la ModINEGI solamente 896 HRU. Durante la ejecución del modelo SWAT, tanto la distribución espacial del tipo de suelo y tamaño de las HRU, influyen directamente en la producción de escurrimientos (Geza y McCray, 2008; Romanowicz *et al.*, 2005). Además, este es altamente sensible a la variabilidad espacial de las propiedades del tipo de suelo en la simulación del balance hídrico en cuencas hidrográficas semiáridas (Muttiah y Wurbs, 2002).

La modelación hidrológica con SWAT ha sido utilizada satisfactoriamente con base en una distribución espacial del tipo de suelo derivada mediante la técnica de DSM, en combinación con información de diversos estudios; para la simulación del escurrimiento superficial diario obteniendo un NSE de 0.64, de la misma manera que ModDSM reproduce los gastos máximos después del período seco (Tavares-Wahren *et al.*, 2016).

La escala de definición de las HRU, afecta directamente al flujo de agua a través de los suelos; por lo tanto, la distribución espacial del tipo de suelo, obtenida mediante la técnica de DSM, puede ser empleada para mejor representación de las unidades

Cuadro 4. Indicadores de evaluación de desempeño del modelo SWAT.

Table 4. Performance evaluation indicators of the soil and water assessment tool (SWAT) model.

Modelación	Periodo	R ²	Clasificación	NSE	Clasificación	PBIAS	Clasificación
ModINEGI	Calibración	0.85	Bueno	0.85	Muy bueno	0.10	Muy bueno
	Validación	0.83	Bueno	0.61	Satisfactorio	-49.23	No satisfactorio
ModDSM	Calibración	0.86	Muy bueno	0.82	Muy bueno	13.65	Bueno
	Validación	0.83	Bueno	0.81	Muy bueno	-18.05	Satisfactorio

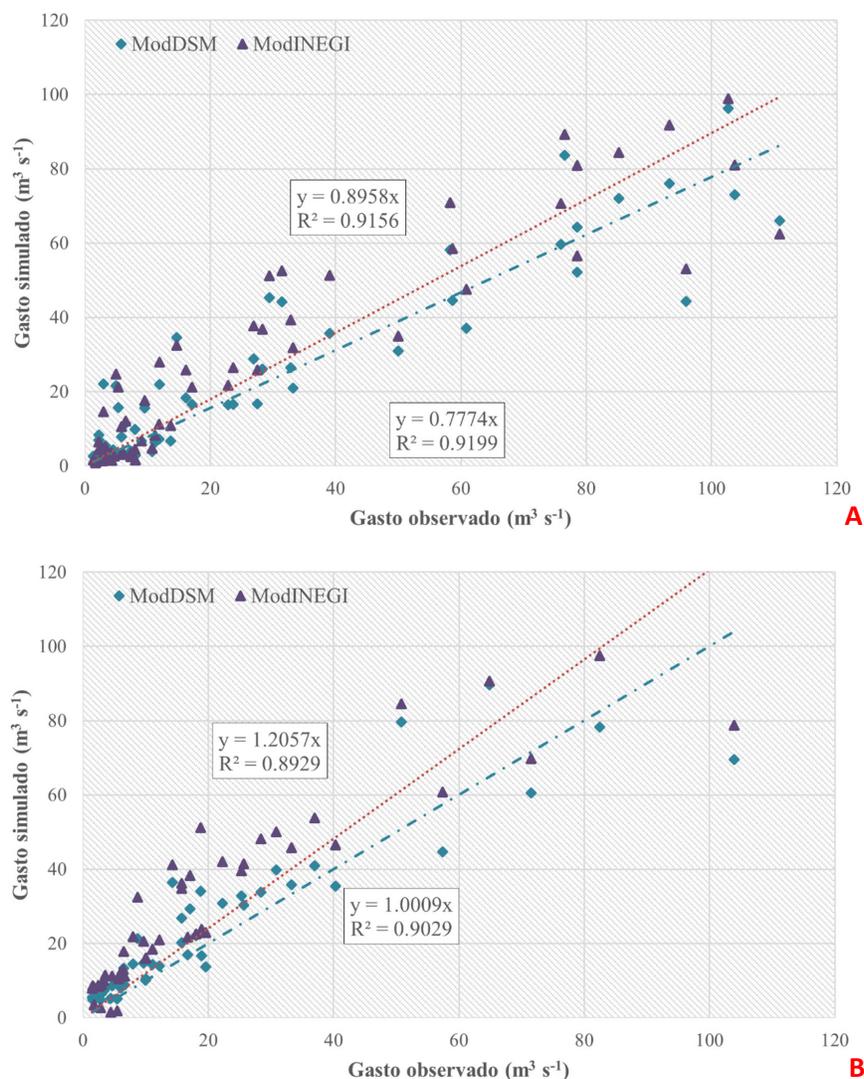


Figura 6. Comparación entre gasto observado y simulado mensual en la cuenca del río Mixteco. (a) Periodo de calibración; b) Periodo de validación.
Figure 6. Comparison between observed and simulated monthly streamflow in the Mixteco River basin. (a) Calibration period; (b) Validation period.

del tipo de suelo existentes en una cuenca, ya que el uso de estos algoritmos mejora significativamente el nivel de precisión del modelo SWAT para la producción de escurrimientos en cuencas semiáridas (Kateb *et al.*, 2019; Rivas-Tabares *et al.*, 2020).

CONCLUSIONES

El modelo hidrológico SWAT se aplicó satisfactoriamente en la cuenca del río Mixteco empleando tanto la distribución espacial de tipo suelo del INEGI como el mapa de unidades de suelo obtenido a través de covariables ambientales mediante la técnica de DSM. El crecimiento vegetativo se calibró de manera adecuada para ambas modelaciones, permitiendo una buena estimación de la producción de biomasa para las diferentes coberturas vegetales de la cuenca.

Los indicadores de evaluación del desempeño durante el periodo de calibración y validación, indican que la variación espacial del tipo de suelo proveniente del DSM, manteniendo constantes los parámetros de cobertura vegetal y la distribución de las

pendientes del terreno, permiten mejorar la estimación del escurrimiento superficial. Por lo tanto, el modelo SWAT permitirá predecir adecuadamente el comportamiento de la producción de escurrimientos bajo diferentes escenarios de cambio de la cobertura vegetal y cambio climático en la cuenca del río Mixteco.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

No aplicable.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia, en esta sección.

FONDOS

No aplicable.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: G.C.G., D.S.F.R. y A.L.P. Metodología y manejo de software: E.P.V., A.L.P. y G.C.G. Supervisión: E.P.V., y A.L.P. Escritura, preparación del borrador original: G.C.G. y A.L.P. Escritura, revisión y edición: G.C.G., E.P.V., H.F.M., R.A.H., A.L.P., E.I.C.I. y D.S.F.R.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación se realizó con financiamiento de la WWF (World Wildlife Fund), a través del Proyecto Mixteca, convenio OM30.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por el apoyo económico de la beca de estudios del autor principal.

LITERATURA CITADA

- Abarca, O., & Bernabé-Poveda, M. A. (2010). Estimación de la capacidad de uso de las tierras del estado Aragua, Venezuela, mediante regresión logística multinomial. *Agronomía Tropical*, 60(4), 397-400.
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., ... Jha, M. K. (2012). SWAT: Model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491-1508. <https://doi.org/10.13031/2013.42256>
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73-89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Bugaets, A. N., Pshenichnikova, N. F., Tereshkina, A. A., Lupakov, S. Y., Gartsman, B. I., Shamov, V. V., ... Kozhevnikova, N. K. (2021). Digital Soil mapping for hydrological modeling by the example of experimental catchments in the south of primorsky krai. *Eurasian Soil Science*, 54(9), 1375-1384. <https://doi.org/10.1134/S1064229321050057>
- Colín-García, G., Fernández-Reynoso, D. S., Martínez-Menez, M. R., Ríos-Berber, J. D., Sánchez-Guzmán, P., Rubio-Granados, E., & Ibáñez-Castillo, L. A. (2017). Digital soil classification through environmental covariables of the Mixteco river watershed. *Terra Latinoamericana*, 35(4), 281-291. <https://doi.org/10.28940/terra.v35i4.264>

- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2012). *Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)*. Consultado el 7 de febrero, 2022, desde <https://app.conagua.gob.mx/bandas/>
- CONAGUA (Comisión Nacional del Agua). (2020). *Sistema de Información de Acuíferos y Cuencas (SIGACUA)*. Consultado el 3 de enero, 2022, desde <https://sigagis.conagua.gob.mx/aprovechamientos/>
- De Andrade-Pereira, M., & Ribeiro-De Melo, C. B. (2020). Impacts of land use and cover change on Paraíba do Sul watershed streamflow using the SWAT model. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 25(12), 1-13. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190034>
- Droz, B., Payraudeau, S., Rodríguez-Martín, J. A., Tóth, G., Panagos, P., Montanarella, L., ... Imfeld, G. (2021). Copper content and export in european vineyard soils influenced by climate and soil properties. *Environmental Science and Technology*, 55(11), 7327-7334. <https://doi.org/10.1021/ACS.EST.0C02093>
- Ercan, M. B., Goodall, J. L., Castronova, A. M., Humphrey, M., & Beekwilder, N. (2014). Calibration of SWAT models using the cloud. *Environmental Modelling & Software*, 62, 188-196. <https://doi.org/10.1016/J.ENVSOFT.2014.09.002>
- 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>
- Geza, M., & McCray, J. E. (2008). Effects of soil data resolution on SWAT model stream flow and water quality predictions. *Journal of Environmental Management*, 88(3), 393-406. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2007.03.016>
- Green, W. H., & Ampt, G. A. (1911). Studies on Soil Physics. *The Journal of Agricultural Science*, 4(1), 1-24. <https://doi.org/10.1017/S0021859600001441>
- Ha, L. T., Bastiaanssen, W. G. M., van Griensven, A., van Dijk, A. I. J. M., & Senay, G. B. (2018). Calibration of spatially distributed hydrological processes and model parameters in SWAT using remote sensing data and an auto-calibration procedure: a case study in a vietnamese river basin. *Water*, 10(2), 212. <https://doi.org/10.3390/W10020212>
- Hargreaves, G. H., & Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96-99. <https://doi.org/10.13031/2013.26773>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2001). *Conjunto de datos vectoriales fisiográficos. Continuo Nacional serie I. Subprovincias fisiográficas. Escala 1:1 000 000*. Consultado el 11 de enero, 2022, desde <https://www.inegi.org.mx/temas/fisiografia/#Descargas>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2007). *Conjunto de datos vectorial edafológico Escala 1:250 000 Serie II (continuo nacional)*. Consultado el 10 de enero, 2022, desde <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2009). *Conjunto de datos vectoriales de la carta de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie IV. Conjunto Nacional*. Consultado el 13 de enero, 2022, desde <https://www.inegi.org.mx/temas/usuarios/#Descargas>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2012). Continental - Continuo de elevaciones mexicano 3.0 (CEM 3.0). Modelo digital de elevaciones escala 1:50 000. Consultado el 3 de enero, 2022, desde <https://www.inegi.org.mx/app/geo2/elevacionesmex/>
- Kateb, Z., Bouchelkia, H., Benmansour, A., & Belarbi, F. (2019). Hydrological modeling using the SWAT model based on two types of data from the watershed of beni haroun dam, Algeria. *Journal of Water and Land Development*, 43(1), 76-89. <https://doi.org/10.2478/JWLD-2019-0065>
- López-Ramírez, S. M., Mayer, A., Sáenz, L., Muñoz-Villers, L. E., Holwerda, F., Looker, N., ... Lezama, C. (2021). A comprehensive calibration and validation of SWAT-T using local datasets, evapotranspiration and streamflow in a tropical montane cloud forest area with permeable substrate in central Veracruz, Mexico. *Journal of Hydrology*, 603, 126781. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2021.126781>
- McBratney, A. B., Mendonça-Santos, M. L., & Minasny, B. (2003). On digital soil mapping. *Geoderma*, 117(1-2), 3-52. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4)
- McBratney, A. B., Odeh, I. O. A., Bishop, T. F. A., Dunbar, M. S., & Shatar, T. M. (2000). An overview of pedometric techniques for use in soil survey. *Geoderma*, 97(3-4), 293-327. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(00\)00043-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(00)00043-4)
- Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. The State and Movement of Water in Living Organisms. *Symposia of the Society for Experimental Biology*. (pp. 205-234). Cambridge, England: Cambridge University Press.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations. *Transactions of the ASABE*, 50(3), 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Muttiah, R. S., & Wurbs, R. A. (2002). Scale-dependent soil and climate variability effects on watershed water balance of the SWAT model. *Journal of Hydrology*, 256(3-4), 264-285. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00554-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00554-6)
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil and water assessment tool theoretical documentation*. College Station, TX, USA: Texas Water Resources Institute.
- Panda, C., Das, D. M., Sahoo, B. C., Panigrahi, B., & Singh, K. K. (2021). Spatio-temporal modeling of surface runoff in ungauged sub-catchments of Subarnarekha river basin using SWAT. *Mausam*, 72(3), 597-606. <https://doi.org/10.54302/MAUSAM.V72I3.1309>
- Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81-92. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:otaosh>2.3.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:otaosh>2.3.co;2)

- QGIS Org (2021). *QGIS Geographic Information System. User's Guide. Version 3.18*. Grüt, Switzerland: QGIS Association.
- Reddy, N. N., Reddy, K. V., Vani, J. S. L. S., Daggupati, P., & Srinivasan, R. (2018). Climate change impact analysis on watershed using QSWAT. *Spatial Information Research*, 26(3), 253-259. <https://doi.org/10.1007/s41324-017-0159-6>
- Rivas-Tabares, D., de Miguel, Á., Willaarts, B., & Tarquis, A. M. (2020). Self-organizing map of soil properties in the context of hydrological modeling. *Applied Mathematical Modelling*, 88, 175-189. <https://doi.org/10.1016/J.APM.2020.06.044>
- Romanowicz, A. A., Vanclouster, M., Rounsevell, M., & La Junesse, I. (2005). Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: A case study in the thyle catchment, Belgium. *Ecological Modelling*, 187(1), 27-39. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLMODEL.2005.01.025>
- Roth, V., Nigussie, T. K., & Lemann, T. (2016). Model parameter transfer for streamflow and sediment loss prediction with SWAT in a tropical watershed. *Environmental Earth Sciences*, 75(19), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-6129-9>
- Salas-Martínez, R., Ibáñez-Castillo, L. A., Arteaga-Ramírez, R., Martínez-Menes, M. R., & Fernández-Reynoso, D. S. (2014). Modelado hidrológico de la cuenca del río mixteco en el estado de Oaxaca, México. *Agrociencia*, 48(1), 1-15.
- Sloan, P. G., & Moore, I. D. (1984). Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds. *Water Resources Research*, 20(12), 1815-1822. <https://doi.org/10.1029/WR020i012p01815>
- Tanksali, A., & Soraganvi, V. S. (2021). Assessment of impacts of land use/land cover changes upstream of a dam in a semi-arid watershed using QSWAT. *Modeling Earth Systems and Environment*, 7(4), 2391-2406. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-00978-5>
- Tavares-Wahren, F., Julich, S., Nunes, J. P., Gonzalez-Pelayo, O., Hawtree, D., Feger, K. H., & Keizer, J. J. (2016). Combining digital soil mapping and hydrological modeling in a data scarce watershed in north-central Portugal. *Geoderma*, 264, 350-362. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2015.08.023>
- Tingem, M., Rivington, M., Azam-Ali, S., & Colls, J. (2007). Assessment of the ClimGen stochastic weather generator at Cameroon sites. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 1(4), 86-92. <https://doi.org/10.4314/ajest.v1i4>
- USDA (United States Department of Agriculture). (1972). *National engineering handbook, section 4: Hydrology*. Washington, DC, USA: USDA
- van Zijl, G., van Tol, J., Tinnefeld, M., & le Roux, P. (2019). A hillslope based digital soil mapping approach, for hypopedological assessments. *Geoderma*, 354. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2019.113888>
- Weber, J. F., & Baigorri-Ocampo, S. B. (2018). Calibración del modelo hidrológico SWAT para una cuenca de la región serrana de Córdoba (Argentina) Calibration of the SWAT hydrological model for a basin in the mountain region of Córdoba (Argentina). *Aqua-LAC*, 11(1), 34-54. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2019-v11-1-03>
- Zhao, F., Wu, Y., Qiu, L., Sun, Y., Sun, L., Li, Q., ... Wang, G. (2018). Parameter Uncertainty Analysis of the SWAT model in a mountain-loess transitional watershed on the chinese loess plateau. *Water*, 10(6), 690. <https://doi.org/10.3390/w10060690>
- Zhu, A. X., & Scott-Mackay, D. (2001). Effects of spatial detail of soil information on watershed modeling. *Journal of Hydrology*, 248(1-4), 54-77. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00390-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00390-0)
- Zuo, D., Xu, Z., Yao, W., Jin, S., Xiao, P., & Ran, D. (2016). Assessing the effects of changes in land use and climate on runoff and sediment yields from a watershed in the Loess Plateau of China. *Science of The Total Environment*, 544, 238-250. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2015.11.060>