



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO EN HIDROCIENCIAS

**COMPARACIÓN DE LOS MODELOS
WEAP Y SWAT EN UNA CUENCA
MONTAÑOSA DEL ESTADO DE
OAXACA, MÉXICO**

MARÍA MAGDALENA NEVÁREZ FAVELA

T E S I S

**PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:**

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2019



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

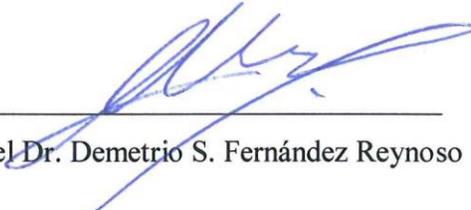
CARTA DE CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALÍAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, la que suscribe, “**María Magdalena Nevárez Favela**”, Alumna de esta Institución, estoy de acuerdo en ser partícipe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor “**Dr. Demetrio S. Fernández Reynoso**”, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis “**COMPARACIÓN DE LOS MODELOS WEAP Y SWAT EN UNA CUENCA MONTAÑOSA DEL ESTADO DE OAXACA, MÉXICO**”, y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del Colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejero o Director de Tesis y la que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las tres partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Texcoco de Mora, Estado de México, a 22 de noviembre de 2019

Nevárez Favela María M.

María Magdalena Nevárez Favela

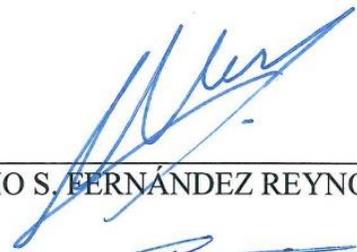

Vo. Bo. del Dr. Demetrio S. Fernández Reynoso

La presente tesis titulada **Comparación de los modelos WEAP y SWAT en una cuenca montañosa del estado de Oaxaca, México** realizada por la alumna: **María Magdalena Nevárez Favela** bajo la dirección del consejo particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRA EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



DR. DEMETRIO S. FERNÁNDEZ REYNOSO

ASESOR



DRA. ANTONIA MACEDO CRUZ

ASESOR



DR. IGNACIO SANCHEZ COHEN

Montecillo, Texcoco, Estado de México, noviembre de 2019.

COMPARACIÓN DE LOS MODELOS WEAP Y SWAT EN UNA CUENCA MONTAÑOSA DEL ESTADO DE OAXACA, MÉXICO

María Magdalena Nevárez Favela, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2019

RESUMEN

La cuenca del río Sordo, localizada al oeste de Oaxaca, México presenta problemas de erosión hídrica y pérdida de biodiversidad. En el presente trabajo se compararon los escurrimientos aforados con los valores simulados por el modelo WEAP (*Water Evaluation And Planning System*) y los resultados del modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) reportados para la misma cuenca por Sánchez-Galindo (2015) y Sánchez-Galindo *et al.* (2017). Se procuró que WEAP, método de la humedad del suelo, utilizara los mismos datos climáticos, de uso de suelo y vegetación y tipo de suelo que SWAT. La comparación se basó en la eficiencia estadística de ambos modelos para simular los escurrimientos mensuales y anuales ocurridos durante el periodo 1975-1985. Se calcularon tres índices de eficiencia: el coeficiente de determinación (r^2), Nash-Sutcliffe (NSE) y el sesgo porcentual (PBIAS). Con respecto a los escurrimientos mensuales aforados WEAP presentó un NSE = 0.73 (Bueno), un PBIAS = -16.05 (Satisfactorio) y una $r^2 = 0.84$ mientras que SWAT, para ese mismo periodo, mostró un NSE = 0.82 (Muy bueno), un PBIAS = -15.92 (Satisfactorio) y una $r^2 = 0.85$. Para los escurrimientos anuales SWAT y WEAP obtuvieron un NSE = 0.73 y 0.3, un $r^2 = 0.76$ y 0.63 y un PBIAS = -4.65 y -16.23, respectivamente. Los dos modelos resultaron satisfactorios para simular escurrimientos mensuales por lo que la elección de uno u otro modelo dependerá de la problemática de la cuenca, los datos con que se cuente y los objetivos que se deseen cumplir.

Palabras clave: SWAT, método de la humedad del suelo, Mixteca oaxaqueña, Nash-Sutcliffe, cuencas hidrográficas.

COMPARISON BETWEEN WEAP AND SWAT MODELS IN A MOUNTAINOUS BASIN AT THE MEXICAN STATE OF OAXACA

María Magdalena Nevárez Favela, M.C.

Colegio de Postgraduados, 2019

ABSTRACT

The Sordo basin is located in the western portion of the state of Oaxaca, Mexico. This presents problems of water erosion and loss of biodiversity. In this paper, the runoff measured was compared with simulated runoff by the WEAP model (Water Evaluation And Planning System) and the results of the SWAT (Soil and Water Assessment Tool) model reported for the same basin by Sánchez-Galindo (2015) and Sánchez-Galindo *et al.* (2017). WEAP-Soil Moisture Method used the same weather data, land use and soil type than SWAT. The comparison was based on the statistical efficiency of both models to simulate the monthly and annual runoff during the period 1975-1985. Three efficiency indices were calculated: the coefficient of determination (r^2), Nash-Sutcliffe efficiency (NSE) and the percent bias (PBIAS). Regarding the monthly runoffs, WEAP presented a NSE = 0.73 (Good), a PBIAS = -16.05 (Satisfactory) and $r^2 = 0.84$ while SWAT, for that same period, reaching a NSE = 0.82 (Very good), a PBIAS = -15.92 (Satisfactory) and a $r^2 = 0.85$. For annual runoffs SWAT y WEAP getting a NSE = 0.73 and 0.3, a $r^2 = 0.76$ and 0.63 and a PBIAS = -4.65 and/ -16.23, respectively. Both models are satisfactory to simulate monthly runoffs and the choice between one or other will depend on the problems to study in the basin, the available data and the hydrological goals.

Keywords: SWAT, Soil Moisture Method, Mixteca oaxaqueña, Nash-Sutcliffe, watersheds.

DEDICATORIA

A mi familia: el pilar de mi vida.

*A mis amigos: la familia que el tiempo ha
colocado en mi camino.*

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por apoyarme económicamente para el cumplimiento de esta etapa.

Al Colegio de Postgraduados por haberme dado la oportunidad de realizar la maestría.

A mis amados padres por haberme moldeado como la persona que soy en la actualidad; este y muchos de mis logros se los debo a ambos. Ustedes me motivan y apoyan constantemente para alcanzar mis metas.

A mis hermanas, hermano, sobrinos, familia por brindarme pequeños momentos de felicidad que me inspiran a seguir adelante.

Al Dr. Mario Roberto Matínez Ménez[†] por fungir como mi profesor consejero durante el primer cuatrimestre pero sobre todo por enseñarme, aconsejarme y acercarme a la familia de Cuencas.

Al Dr. Demetrio S. Fernández Reynoso, la persona que me guio durante la mayor parte de la maestría. Gracias por orientarme y por las interesantes pláticas al respecto de la vida.

A la Dra. Antonia Macedo Cruz, es usted una mujer muy inteligente y llena de inquietud por seguir aprendiendo, un ejemplo a seguir. Gracias por aceptar apoyarme en esta etapa.

Al Dr. Ignacio Sánchez Cohen, gracias por apoyarme desde la etapa de licenciatura.

Al Dr. Abel Quevedo Nolasco, mil gracias por apoyarme más allá del conocimiento. Sus palabras de aliento llegaron en el momento más difícil que pasé durante la maestría.

A mis compañeros, amigos de maestría, gracias por apoyarme con las tareas, darme consejos o simplemente escucharme, gracias por las tardes de café, noches de baile, comidas, fiestas, los quiero mucho.

A Moisés Márquez Velázquez, una persona especial en mi vida que me ha brindado apoyo y cariño.

A los maestros del Colegio de Postgraduados por brindarme sus conocimientos, especialmente a aquellos que también me ofrecieron su amistad.

A los trabajadores y administrativos de esta universidad que me apoyaron en muchas ocasiones.

CONTENIDO

| | |
|---|-----|
| RESUMEN | iv |
| ABSTRACT..... | v |
| LISTA DE CUADROS..... | xi |
| LISTA DE FIGURAS..... | xii |
| 1. INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2. OBJETIVOS | 3 |
| 2.1. General | 3 |
| 2.2. Particulares | 3 |
| 3. HIPÓTESIS..... | 3 |
| 4. REVISIÓN DE LITERATURA | 4 |
| 4.1. Modelos hidrológicos..... | 4 |
| 4.2. Historia de la modelación hidrológica | 5 |
| 4.3. Clasificación de los modelos hidrológicos..... | 5 |
| 4.4. <i>Water Evaluation And Planning (WEAP)</i> | 7 |
| 4.4.1. Método de lluvia-escorrimento..... | 7 |
| 4.4.2. Método de demandas de riego | 7 |
| 4.4.3. Método MABIA..... | 8 |
| 4.4.4. Modelo de crecimiento de plantas | 8 |
| 4.4.5. Método de la humedad del suelo | 8 |
| 4.5. <i>Soil and Water Assessment Tool (SWAT)</i> | 13 |
| 4.5.1. Hidrología | 15 |
| 4.5.2. Clima..... | 16 |
| 4.5.3. Temperatura del suelo..... | 16 |
| 4.5.4. Erosión | 16 |

| | | |
|---------|---|----|
| 4.5.5. | Uso de suelo/crecimiento de cultivos | 17 |
| 4.5.6. | Nutrientes | 17 |
| 4.5.7. | Pesticidas..... | 17 |
| 4.5.8. | Manejo | 18 |
| 4.6. | Modelado de la cuenca del río Sordo con SWAT | 18 |
| 4.7. | Trabajos realizados con WEAP en México..... | 18 |
| 4.8. | Trabajos realizados con WEAP en el mundo..... | 19 |
| 4.9. | WEAP vs. SWAT..... | 22 |
| 4.10. | Indicadores de eficiencia | 24 |
| 4.10.1. | Coeficiente de determinación (r^2) | 24 |
| 4.10.2. | Índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE)..... | 25 |
| 4.10.3. | Sesgo porcentual (PBIAS) | 26 |
| 5. | MATERIALES Y MÉTODOS | 27 |
| 5.1. | Caracterización biofísica del área de estudio | 27 |
| 5.1.1. | Precipitación | 28 |
| 5.1.2. | Temperatura | 30 |
| 5.1.3. | Suelos..... | 32 |
| 5.1.4. | Uso de suelo y vegetación..... | 34 |
| 5.1.5. | Hidrología | 35 |
| 5.2. | Metodología | 36 |
| 5.2.1. | Selección del método | 38 |
| 5.2.2. | Delimitación del área y años de estudio | 38 |
| 5.2.3. | Supuestos clave/ <i>Key assumptions</i> | 40 |
| 5.2.4. | Alimentación de datos..... | 40 |
| 5.2.5. | Datos climáticos..... | 41 |

| | | |
|--------|---|----|
| 5.2.6. | Datos hidrométricos | 45 |
| 5.2.7. | Datos de tipo de suelo/uso de suelo y vegetación..... | 46 |
| 6. | RESULTADOS Y DISCUSIÓN | 59 |
| 6.1. | Caudales medios mensuales | 59 |
| 6.2. | Caudales medios anuales..... | 62 |
| 6.3. | Resumen de resultados | 63 |
| 7. | CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 65 |
| 7.1. | Conclusiones | 65 |
| 7.2. | Recomendaciones..... | 65 |
| 8. | LITERATURA CITADA | 67 |

LISTA DE CUADROS

| | |
|---|----|
| Cuadro 1. Valores de índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y coeficiente de determinación (r^2) de los modelos WEAP y SWAT en algunas cuencas de México y el mundo. | 23 |
| Cuadro 2. Clasificaciones de eficiencia Nash-Sutcliffe y porcentaje BIAS para el cálculo de escurrimientos mensuales. | 26 |
| Cuadro 3. Suelos presentes en la cuenca del río Sordo..... | 33 |
| Cuadro 4. Uso de suelo y vegetación de la cuenca del río Sordo. | 34 |
| Cuadro 5. Variables climáticas del método de la humedad del suelo-WEAP. | 42 |
| Cuadro 6. Estaciones meteorológicas utilizadas en la modelación hidrológica. | 42 |
| Cuadro 7. Variables climáticas mensuales que requiere el generador climático de SWAT. | 44 |
| Cuadro 8. Estaciones hidrométricas ubicadas en la cuenca del río Sordo. | 46 |
| Cuadro 9. Escurrimientos mensuales ($m^3 s^{-1}$) en la estación hidrométrica Ixtayutla. | 46 |
| Cuadro 10. Variables de tipo de suelo/uso de suelo y vegetación del método de la humedad del suelo. | 47 |
| Cuadro 11. Descripción de los parámetros fisiotécnicos requeridos por el modelo SWAT..... | 47 |
| Cuadro 12. Variables de suelo del modelo SWAT. | 49 |
| Cuadro 13. Valores de K_c utilizados en la cuenca del río Sordo..... | 50 |
| Cuadro 14. Profundidad de raíces propuesta para cada uso de suelo y vegetación. | 51 |
| Cuadro 15. Profundidades de la primera capa de suelo de la cuenca del río Sordo. | 51 |
| Cuadro 16. Valores de la capacidad de almacenamiento de agua de la zona radical (S_w). | 52 |
| Cuadro 17. Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda por tipo de suelo (D_{ws}). | 53 |
| Cuadro 18. Índices de área foliar por tipo de cobertura ingresados a WEAP. | 55 |
| Cuadro 19. Valores de conductividad hidráulica en la zona radical. | 55 |
| Cuadro 20. Conductividad hidráulica de la zona profunda por tipo de suelo (K_{ds}). | 57 |
| Cuadro 21. Evaluación de la eficiencia para simular escurrimientos mensuales y anuales de WEAP y SWAT. | 64 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Esquema del método de la humedad del suelo (Angarita <i>et al.</i> , 2018). | 10 |
| Figura 2. Fase terrestre del ciclo hidrológico en SWAT (Neitsch <i>et al.</i> , 2011)..... | 14 |
| Figura 3. Fase de enrutamiento o tránsito del ciclo hidrológico en SWAT (Neitsch <i>et al.</i> , 2011). | 14 |
| Figura 4. Localización de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México..... | 27 |
| Figura 5. Distribución de la precipitación media anual en la cuenca del río Sordo. | 29 |
| Figura 6. Precipitación media mensual de tres estaciones meteorológicas. | 30 |
| Figura 7. Distribución de la temperatura media anual de la cuenca del río Sordo. | 31 |
| Figura 8. Temperatura media mensual de tres estaciones meteorológicas. | 32 |
| Figura 9. Suelos de la cuenca del río Sordo (Sánchez-Galindo, 2015)..... | 33 |
| Figura 10. Uso de suelo y vegetación de la cuenca del río Sordo (WWF, 2014). | 35 |
| Figura 11. Red fluvial de la cuenca del río Sordo..... | 36 |
| Figura 12. Metodología utilizada en el modelo WEAP. | 37 |
| Figura 13. Esquema de la cuenca del río Sordo en la plataforma del modelo WEAP..... | 39 |
| Figura 15. Expresiones de supuestos clave exportadas de WEAP a Excel. | 40 |
| Figura 14. Ventana de ingreso de datos en el modelo WEAP. | 41 |
| Figura 16. Modelo cartográfico utilizado para interpolar VV y HR de las estaciones del CFSR y asignar el dato resultante a las estaciones meteorológicas de la cuenca. | 45 |
| Figura 17. Caudales medios mensuales observados y simulados por SWAT y WEAP de la cuenca del río Sordo..... | 60 |
| Figura 18. Relación entre caudales medios mensuales observados y simulados con SWAT y WEAP en la cuenca del río Sordo..... | 61 |
| Figura 19. Caudales medios anuales observados y simulados por SWAT y WEAP de la cuenca del río Sordo..... | 62 |
| Figura 20. Relación entre caudales medios anuales observados y simulados por SWAT y WEAP de la cuenca del río Sordo..... | 63 |

1. INTRODUCCIÓN

Globalmente, el deterioro de los recursos naturales es cada vez más grave. Las causas de este problema pueden ser tanto naturales como antropogénicas, sin embargo este último factor es el que se puede y se debería controlar. No obstante, el crecimiento poblacional actual trae consigo la necesidad de más recursos. Motivo por el cual es necesario conocer y evaluar la interacción entre el comportamiento humano y el estado de los recursos.

En México el estado de Oaxaca es rico en diversidad de recursos naturales; sin embargo la región Mixteca presenta una fuerte degradación de estos. La cuenca del río Sordo, 7 751.42 km², tributaria del río Verde, que desemboca al Océano Pacífico, cubre el 54% de la Mixteca Oaxaqueña (Sánchez-Galindo, Fernández-Reynoso, Martínez-Méñez, Rubio-Granados, & Ríos-Berber, 2017).

La cuenca del río Sordo presenta material geológico sedimentario (70% de su superficie) y un relieve escarpado (pendiente media el 36.3%), además de altas intensidades de lluvia (46 ± 13.3 mm hr⁻¹ media anual). Estas características provocan procesos erosivos y de sucesión vegetal en la cuenca, no obstante, la intervención del hombre ha acelerado estos procesos con el sobrepastoreo, mal aprovechamiento forestal y la agricultura en ladera (Sánchez-Galindo *et al.*, 2017).

De este modo es necesario comprender los procesos relacionados con el recurso hídrico que están ocurriendo en la cuenca del río Sordo, y sus posibles cambios, para que los tomadores de decisiones establezcan estrategias para el desarrollo sustentable de la región.

Una de las herramientas más utilizadas para el análisis de los procesos que ocurren en una cuenca son los modelos hidrológicos (Singh & Woolhiser, 2002). Estos son representaciones de los componentes del ciclo hidrológico, en otras palabras, son aproximaciones de la realidad y en consecuencia las salidas de un sistema real puede predeterminarse con cierto grado de confianza (Salgado & Güitrón, 2012).

En 2017, Sánchez-Galindo *et al.* elaboraron un estudio en la cuenca del río Sordo Oaxaca con el modelo hidrológico SWAT, en el cuál evaluaron la eficiencia de esta herramienta para simular biomasa, escurrimientos y sedimentos durante el periodo 1975 a 1985. En este trabajo, se optó por probar las bondades del modelo, WEAP, el cual incluye diferentes algoritmos matemáticos y se enfoca en el recurso agua y su gestión. Por lo tanto en esta investigación sólo se consideran los escurrimientos.

SWAT es un modelo de tiempo continuo, semidistribuido, basado en procesos, desarrollado para evaluar estrategias de gestión sobre recursos hídricos y contaminación de fuentes no puntuales en grandes cuencas. Su directriz es el balance hídrico, el cual afecta el crecimiento de las plantas y el movimiento de sedimentos, nutrientes, pesticidas y patógenos (Cuceloglu, Abbaspour, & Ozturk, 2017). Por otra parte WEAP es un modelo híbrido conceptual-base física y de un número reducido de parámetros que simula los componentes, naturales e intervenidos, de los sistemas de recursos hídricos que ha sido aplicado en cuencas de diversos tamaños y es adecuado para la evaluación de escenarios (Hernández-Vargas, 2017).

2. OBJETIVOS

2.1. General

Comparar la eficiencia de los modelos WEAP (*Water Evaluation And Planning*) y SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*), para simular los escurrimientos anuales y mensuales medidos en la estación hidrométrica Ixtayutla (20021) en la cuenca del río Sordo, periodo 1975 a 1985.

2.2. Particulares

- Utilizar los valores incorporados, parámetros calibrados y datos resultantes de la herramienta SWAT, que sean aplicables al modelo de WEAP, para estimar los escurrimientos de la cuenca del río Sordo, Oaxaca.
- Comparar los modelos WEAP y SWAT, a través de índices de eficiencia (NSE, PBIAS y r^2), para estimar escurrimientos mensuales y anuales.

3. HIPÓTESIS

Los modelos WEAP y SWAT evalúan de manera similar el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Sordo, según los índices de eficiencia NSE, PBIAS y r^2 .

4. REVISIÓN DE LITERATURA

4.1. Modelos hidrológicos

Un modelo es una representación conceptual de las interacciones y respuestas de una condición real, y que es capaz de hacer pronósticos bajo un conjunto de condiciones propuestas. En el ámbito de la modelación hidrológica, los modelos son representaciones de los fenómenos hidrológicos asociados al ciclo del agua, estos son aproximaciones de la realidad y en consecuencia sus resultados pueden predeterminarse con cierto grado de confianza (Salgado & Güitrón, 2012).

La cuenca es el objeto de estudio de la mayoría de los modelos hidrológicos y la hidrología de cuencas es la rama de la hidrología que se ocupa de la integración de los procesos hidrológicos y su respuesta a escala de cuenca (Singh & Woolhiser, 2002).

Los modelos permiten el entendimiento cualitativo de un proceso, pero la comprensión cuantitativa puede ser limitada. La posibilidad de expresar los procesos físicos como un conjunto de ecuaciones matemáticas detalladas puede no existir, o bien, las ecuaciones pueden ser muy complejas, recurriendo a simplificaciones para su uso (Carrillo, 2010).

La modelación matemática de cuencas hidrográficas se emplea para abordar un amplio espectro de problemas ambientales y de recursos hídricos (Singh & Woolhiser, 2002). De manera general, un modelo hidrológico es un sistema de ecuaciones y procedimientos compuestos por variables y parámetros. Los parámetros mantienen su valor inalterado durante todo el proceso estudiado. Por lo tanto un parámetro tiene el mismo valor para todos los intervalos de tiempo, aunque no significa que no pueda variar este espacialmente. Por otro lado, las variables pueden cambiar a lo largo del tiempo durante el periodo que el modelo se esté ejecutando (Carrillo, 2010).

Cuando las ecuaciones matemáticas son convertidas en procesos numéricos discretos, los procesos complejos en escalas muy detalladas se parametrizan pudiendo no ser claramente representadas en el modelo. En algunos casos, estos conjuntos de ecuaciones pueden ser vistos como una colección de hipótesis que conectan entradas y salidas del sistema. Un mismo proceso puede ser representado de diferentes maneras, siendo algunas más apropiadas para determinados casos. Por lo tanto, no existe un modelo único que sea el mejor, pero puede existir aquel que describa mejor un fenómeno (Carrillo, 2010).

Para la utilización de las herramientas de modelación es necesario la adquisición de datos mediante sensores remotos y tecnología espacial, modelos digitales de terreno y elevación, marcadores químicos, sistemas de información geográfica, gestión de datos, topografía, entre otros (Singh & Woolhiser, 2002).

4.2. Historia de la modelación hidrológica

La modelación hidrológica comenzó a principios del siglo XIX para el diseño de canales, redes de drenaje, presas, puentes, diques y sistemas de distribución de agua. Hasta mediados del siglo XX, la modelación hidrológica se limitó a explicar mediante expresiones matemáticas simples los mecanismos individuales involucrados en los principales procesos del ciclo hidrológico. Entre ellos se pueden nombrar: el método racional, la curva de infiltración de Horton, los trabajos de Thornthwaite y Pennman para estimar la evapotranspiración, etc. (Singh & Woolhiser, 2002; Weber, Jorquera, & Dasso, 2011).

El origen se remonta al método racional desarrollado por Mulvany en 1850 y a un modelo creado por Imbeau en 1892, basado en eventos, que relaciona el pico de escorrentía de la tormenta con la intensidad de la lluvia. A estos modelos siguieron muchos más, pero el mayor cambio se presentó con la aparición de la computadora y la revolución digital de la década de 1960. En esta década se realizó el primer intento de modelar virtualmente todo el ciclo hidrológico, surgiendo así el *Stanford Watershed Model-SWM* de Crawford y Linsley en 1966 (Singh & Woolhiser, 2002).

En los últimos años se dispone, con suma facilidad, a través del Internet de software con licencia libre para la modelación hidrológica, sin embargo, es importante tener en cuenta que se necesitan modelos más simples que puedan proveer una razonable simulación, requieran de pocos datos y permitan considerar la diferencia temporal con que suceden los distintos fenómenos en la cuenca (Weber *et al.*, 2011).

4.3. Clasificación de los modelos hidrológicos

Un modelo hidrológico es un conjunto de ecuaciones matemáticas de los componentes del ciclo hidrológico. La estructura y arquitectura del modelo están determinadas por el objetivo para el cual se construye el modelo. Por ejemplo, un modelo hidrológico para el control de inundaciones es bastante diferente al de la generación de energía hidroeléctrica o la operación de reservorio. Asimismo, un modelo para la planificación de los recursos hídricos es significativamente diferente

al utilizado para el análisis de los recursos hídricos o la gestión ecológica (Singh & Woolhiser, 2002).

Singh (1995), citado por Singh & Woolhiser (2002), clasificó los modelos hidrológicos con base en la descripción del proceso, escala de tiempo, escala espacial, técnicas de solución, uso de suelo, y uso del modelo. Por su parte Carrillo (2010) menciona que los modelos pueden ser clasificados en función de diferentes aspectos como el tipo de variables utilizadas en el modelo (estocásticas o determinísticas), o el tipo de relaciones entre estas variables (empíricas o basadas en procesos), la forma de representación de datos (discretos o continuos), la existencia de relaciones espaciales (puntuales o distribuidos), y la existencia de dependencia temporal (estáticos o dinámicos).

Weber *et al.* (2011) aluden que los modelos pueden dividirse en dos grandes categorías, 1) físicos o materiales y 2) formales o matemáticos. Los primeros son representaciones físicas simplificadas del prototipo, como por ejemplo los simuladores de lluvia, estos modelos son caros y deben construirse especialmente para el caso de estudio. Los segundos conciben al sistema por medio de un grupo de abstracciones matemáticas que describen fases relevantes del ciclo hidrológico con el objeto de simular la transformación de las entradas en salidas del sistema.

Los modelos matemáticos pueden ser clasificados de la siguiente manera (Weber *et al.*, 2011):

- **Determinísticos**, son formulados siguiendo las leyes de la física (materia y energía) y/o procesos químicos descritos por ecuaciones diferenciales.
- **Probabilísticos**, se formulan siguiendo las leyes del azar o probabilidad. Pueden ser estadísticos, toman en cuenta los parámetros estadísticos de las variables que se desean crear, o estocásticos, generan valores para cada variable con base en sus parámetros estadísticos además de la dependencia que tiene la variable en el tiempo, espacio e incluso con otras variables.
- **Conceptuales**, son representaciones simplificadas de los procesos físicos, usualmente recaen sobre descripciones matemáticas que simulan procesos complejos basándose en pocos parámetros conceptuales clave.

- **Paramétricos o empíricos**, son los más simples, consisten en una ecuación (o ecuaciones) algebraica que contiene uno o más parámetros a ser determinados por el análisis de datos u algún otro medio empírico.

El modelo WEAP permite cuantificar el balance de agua a diferentes escalas, es decir, tanto a nivel parcela como a nivel de sistemas complejos de ríos (Sieber & Purkey, 2015). Este modelo se ha utilizado con diferentes objetivos como, análisis de sitios de demanda (Amin, Iqbal, Asghar, & Ribbe, 2018), simulaciones de escurrimientos superficiales y acuíferos (López-García, Manzano, & Ramírez, 2017), conservación de agua, operación de presas o sitios de almacenamiento (Sandoval-Solis, Mckinney, Teasley, & Patino-Gómez, 2011), generación de energía hidroeléctrica (Angarita *et al.*, 2018), derechos de agua e identificación de sitios prioritarios, etc.

4.4. Water Evaluation And Planning (WEAP)

WEAP posee cinco métodos o sub-modelos, (1) Método de lluvia-escurrimiento y (2) Método de demandas de riego, ambas versiones con el enfoque de coeficiente simplificado; (3) Método de la humedad del suelo; (4) Método MABIA; y (5) Modelo de crecimiento de plantas (Sieber & Purkey, 2015).

4.4.1. Método de lluvia-escurrimiento

El método de lluvia-escurrimiento (*Rainfall Runoff Method - Simplified Coefficient Method*) determina la evapotranspiración de cultivos de riego y secano usando coeficientes de cultivo. La lluvia no consumida por la evapotranspiración se simula como escorrentía a un río o se fracciona entre escurrimiento superficial e infiltración a un acuífero a través de *links* de escorrentía/infiltración (Sieber & Purkey, 2015).

4.4.2. Método de demandas de riego

El método de demandas de riego (*Irrigation Demands Only Method - Simplified Coefficient Method*) es el más simple. Utiliza los coeficientes de cultivo para calcular la evapotranspiración potencial en la cuenca, luego determina la demanda de riego necesaria (adicional a la lluvia) para cumplir esta evapotranspiración. No simula procesos de escorrentía o infiltración, ni rastrea cambios en la humedad del suelo (Sieber & Purkey, 2015).

4.4.3. Método MABIA

El Método MABIA (*MABIA Method - FAO 56, Dual Kc, Daily*) es una simulación diaria de transpiración, evaporación, requerimientos y programación de riego, crecimiento y rendimiento de cultivos, e incluye módulos para estimar la evapotranspiración de referencia y la capacidad de almacenamiento de agua del suelo. Se deriva del conjunto de herramientas de software MABIA, desarrollado en el *Institut National Agronomique de Tunisie* por el Dr. Ali Sahli y Mohamed Jabloun (Sieber & Purkey, 2015).

MABIA utiliza el método *Kc* 'dual', como se describe en el documento de riego y drenaje de la FAO no. 56, el valor de *Kc* se divide en un coeficiente de cultivo 'basal', *Kcb*, y otro coeficiente que representa la evaporación de la superficie del suelo, *Ke*. El coeficiente de cultivo basal representa las condiciones reales de *ET* cuando la superficie del suelo está seca pero hay suficiente humedad en la zona de la raíz para soportar la transpiración completa. De esta manera, MABIA es una mejora con respecto a CROPWAT, que utiliza un único método *Kc* el cual no separa la evaporación y la transpiración (Sieber & Purkey, 2015).

4.4.4. Modelo de crecimiento de plantas

Plant Growth Model simula el crecimiento de la planta, el uso del agua y el rendimiento utilizando un paso de tiempo diario. Fue desarrollado, en 2015 (Yaykiran, Cuceloglu, & Ekdal, 2019), para el estudio de los efectos de la variabilidad en la concentración atmosférica de CO₂, estrés por temperatura, la variabilidad en la duración de la temporada, y el efecto del estrés hídrico en la planta y el rendimiento de los cultivos. Requiere la especificación de parámetros que controlen la tasa de desarrollo de la planta y el uso del agua. Las fórmulas de crecimiento se cimientan en el enfoque adoptado en los modelos SWAT y EPIC que a su vez permiten el uso de sus bases de datos para la parametrización del modelo. El comportamiento hidráulico de la humedad del suelo se simula en 13 capas que representan los 3.5 m superiores del perfil del suelo. Los resultados del modelo incluyen escurrimiento superficial, percolación profunda, ET de la planta, estrés por agua y temperatura, producción y rendimiento de biomasa (Sieber & Purkey, 2015).

4.4.5. Método de la humedad del suelo

El Método de la humedad del suelo (*Rainfall Runoff Method - Soil Moisture Method*) es el más complejo de los cinco que posee WEAP, representa a la cuenca a través de dos capas de suelo

(Figura 1). Mediante funciones empíricas describe la evapotranspiración, escurrimiento superficial, escurrimiento subsuperficial y percolación profunda. Este método permite la caracterización del uso de suelo y/o tipos de suelos impactados por estos procesos (Sieber & Purkey, 2015; Yates, Sieber, Purkey, & Huber-Lee, 2005).

En el modelo la cuenca puede ser dividida en subcuencas, las cuales a su vez pueden ser divididas en N áreas con diferentes usos de suelo y vegetación j (Yates *et al.*, 2005).

El balance de agua en la zona radicular (Ecuación 1) y en la zona profunda (Ecuación 2) son calculados por tipo de cobertura (Yates *et al.*, 2005).

$$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t) Kc_j(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t) z_{1,j}^{\frac{LAI_j}{2}} - f_j k_j z_{1,j}^2 - (1 - f_j) k_j z_{1,j}^2 \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

Variables:

Sw_j : Capacidad de almacenamiento de agua en la zona radicular del suelo (mm).

$z_{1,j}$: Almacenamiento relativo de agua en la zona radicular del suelo dado como una fracción del almacenamiento total efectivo (1, 0).

$P_e(t)$: Precipitación efectiva en el tiempo t (mm).

$PET(t)$: Evapotranspiración potencial del cultivo de referencia de Penman-Montieth (mm tiempo⁻¹).

$Kc_j(t)$: Coeficiente de cultivo en el tiempo t (adimensional).

LAI_j : Índice de área foliar (m² m⁻²). El escurrimiento decrece conforme aumenta este valor.

f_j : Parámetro de ajuste cuasi-físico relacionado con el tipo de suelo, uso de suelo y vegetación, y topografía que direcciona el agua ya sea horizontalmente (f_j) o verticalmente ($1-f_j$) (1.0 = 100% horizontal, 0 = 100% vertical).

k_j : Es un estimado de la conductividad del almacenamiento en la zona radicular (mm tiempo⁻¹).

Términos:

$SW_j \frac{dz_{1,j}}{dt}$: Cambio de humedad del suelo en la zona radicular.

$P_e(t)$: Precipitación efectiva.

$PET(t) Kc_{,j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right)$: Evapotranspiración.

$P_e(t) z_{1,j}^2$: Esguerrimiento superficial.

$f_j k_j z_{1,j}^2$: Flujo subsuperficial.

$(1 - f_j) k_j z_{1,j}^2$: Percolación profunda.

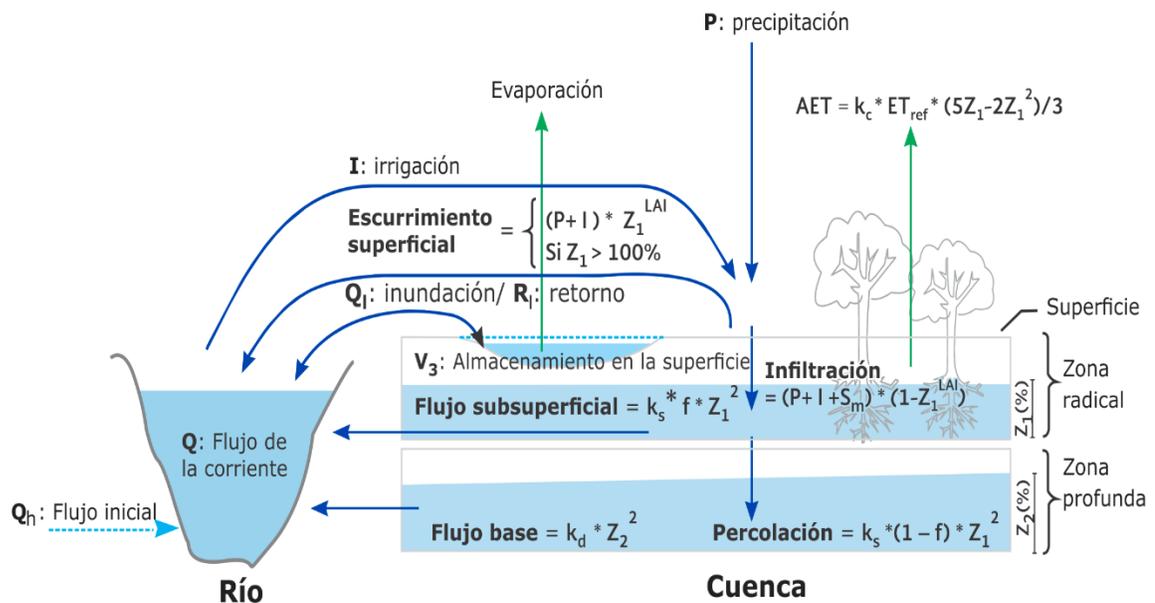


Figura 1. Esquema del método de la humedad del suelo (Angarita *et al.*, 2018).

Es importante mencionar que la variable LAI_j también es representada con las iniciales RRF_j , *runoff resistance factor* o factor de resistencia al esguerrimiento por muchos autores, entre ellos Sieber & Purkey (2015) autores de la guía de usuario.

$$Dw \frac{dz_{2,j}}{dt} = (1 - f_j) k_j z_{1,j}^2 - k_2 z_{2,j}^2 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

Variables:

Dw : Capacidad de almacenamiento de agua en la capa profunda del suelo (mm).

$z_{2,j}$: Almacenamiento relativo de agua en la capa profunda del suelo dado como una fracción del almacenamiento total efectivo (1, 0).

f_j : Parámetro de ajuste cuasi-físico relacionado con el tipo de suelo, uso de suelo y vegetación, y topografía que direcciona el agua ya sea horizontalmente (f_j) o verticalmente ($1-f_j$) (1.0 = 100% horizontal, 0 = 100% vertical).

k_j : Estimado de la conductividad del almacenamiento en la zona radicular (mm tiempo⁻¹).

$z_{1,j}$: Almacenamiento relativo de agua en la zona radicular del suelo dado como una fracción del almacenamiento total efectivo (1, 0).

k_2 : Tasa de conductividad del almacenamiento en la capa profunda del suelo (mm tiempo⁻¹).

Términos:

$Dw \frac{dz_{2,j}}{dt}$: Cambio de humedad del suelo en la zona profunda del suelo.

$(1 - f_j) k_j z_{1,j}^2$: Percolación profunda.

$k_2 z_{2,j}^2$: Flujo base.

La Ecuación 2 se utiliza en modelos que no integran acuíferos. La Ecuación 1 y la Ecuación 2 se resuelven con el algoritmo de Runge-Kutta de cuarto orden (Yates *et al.*, 2005).

Las contribuciones de flujo superficial y subsuperficial de la capa superior, Ro de cada subcuenca en el tiempo t se calculan con la Ecuación 3. El flujo base, Bf , se presenta en la Ecuación 4 (Yates *et al.*, 2005).

$$Ro(t) = \sum_{j=1}^N A_j \left(P_e(t) z_{1,j}^{\frac{LAI_j}{2}} + f_j k_j z_{1,j}^2 \right) \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

Variables:

$Ro(t)$: Contribución de flujo superficial y subsuperficial de cada subcuenca en el tiempo t .

A_j : Área contribuyente de cada tipo de cobertura, j (km² o ha).

$P_e(t)$: Precipitación efectiva en el tiempo t (mm).

$z_{1,j}$: Almacenamiento relativo de agua en la zona radicular del suelo dado como una fracción del almacenamiento total efectivo (1, 0).

LAI_j : Índice de área foliar (m² m⁻²). El escurrimiento decrece conforme aumenta este valor.

f_j : Parámetro de ajuste cuasi-físico relacionado con el tipo de suelo, uso de suelo y vegetación, y topografía que direcciona el agua ya sea horizontalmente (f_j) o verticalmente ($1-f_j$) (1.0 = 100% horizontal, 0 = 100% vertical).

k_j : Estimado de la conductividad del almacenamiento en la zona radicular (mm tiempo⁻¹).

Términos:

$Ro(t)$: Contribución de flujo superficial y subsuperficial de cada subcuenca en el tiempo t .

$P_e(t) z_{1,j}^{\frac{LAI_j}{2}}$: Escurrimiento superficial.

$f_j k_j z_{1,j}^2$: Flujo subsuperficial.

$$Bf(t) = \sum_{j=1}^N A_j (k_2 z_{2,j}^2) \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

$Bf(t)$: Flujo base en el tiempo t .

A_j : Área contribuyente de cada tipo de cobertura, j (km^2 o ha).

k_2 : Tasa de conductividad del almacenamiento en la capa profunda (mm tiempo^{-1}).

$z_{2,j}$: Almacenamiento relativo de agua de la capa profunda del suelo dado como una fracción del almacenamiento total efectivo (1, 0).

4.5. Soil and Water Assessment Tool (SWAT)

SWAT son las siglas en inglés de un modelo de simulación continuo para la Evaluación del Suelo y Agua para una cuenca hidrográfica; el modelo a escala fue desarrollado por el Dr. Jeff Arnold para el Servicio de Investigación Agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos Americanos (ARS-USDA por sus siglas en inglés) y se encuentra disponible en <https://swat.tamu.edu/> (Neitsch, Arnold, Kiniri, & Williams, 2011).

SWAT fue desarrollado a principios de 1990 para predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo en la generación de agua, sedimentos y producción de sustancias agrícolas químicas, en cuencas grandes y complejas con variedad de suelos, uso de tierra y condiciones de manejo sobre un tiempo prolongado (Neitsch *et al.*, 2011).

Los principales componentes del modelo se agrupan en: hidrología, clima, sedimentación, temperatura del suelo, crecimiento de cultivos, nutrientes, plaguicidas y manejo de cultivos (Arnold, Srinivasan, Muttiah, & Williams, 1998).

(Neitsch *et al.*, 2011) señalan que el balance hídrico en la cuenca es el fundamento del modelo SWAT. La simulación hidrológica de la cuenca se divide en dos fases; la terrestre, que controla la cantidad de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas que se cargan en el canal principal de cada subcuenca (Figura 2); y la de agua o enrutamiento, que es el movimiento del agua, los sedimentos, nutrientes y pesticidas a través de la red fluvial de la cuenca hasta la salida (Figura 3). Las cargas

se encausan a través de la red de arroyos de la cuenca utilizando una estructura de comando similar a la de HYMO (Williams & Hann, 1972).

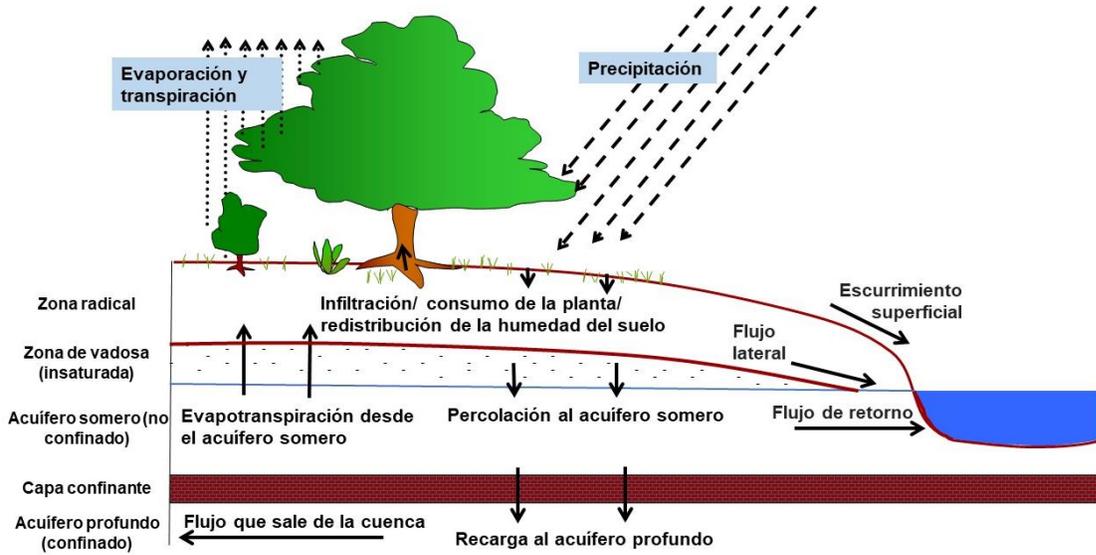


Figura 2. Fase terrestre del ciclo hidrológico en SWAT (Neitsch *et al.*, 2011).

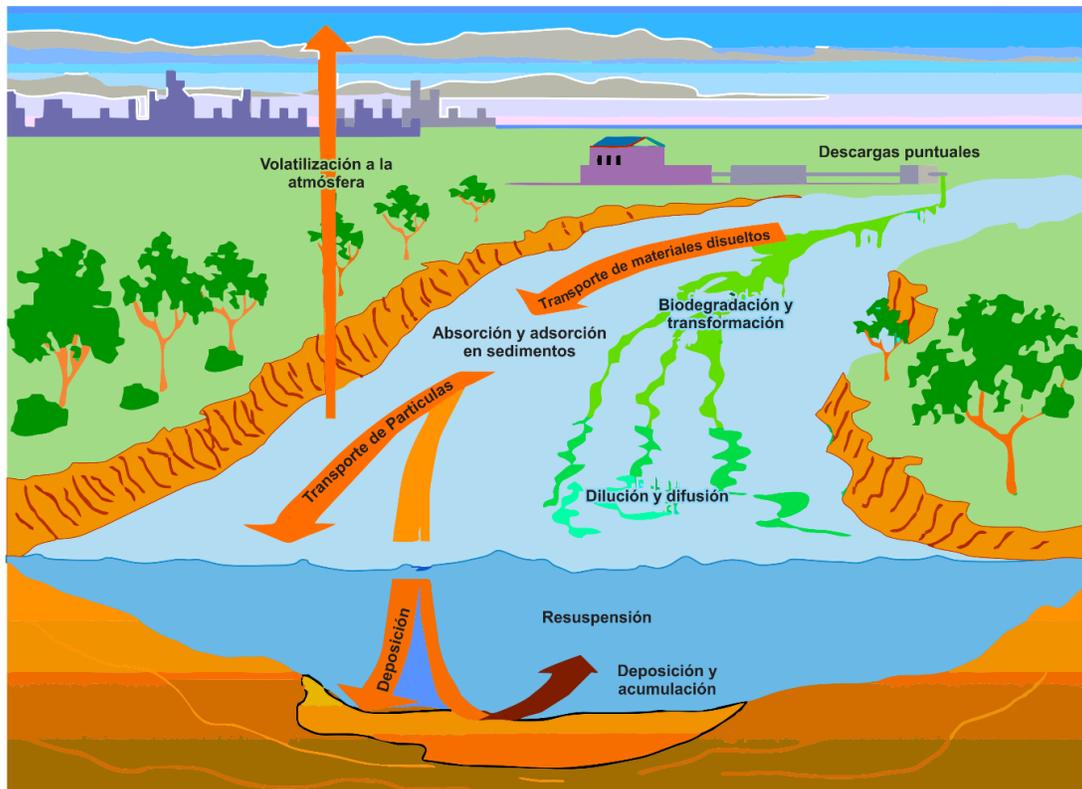


Figura 3. Fase de enrutamiento o tránsito del ciclo hidrológico en SWAT (Neitsch *et al.*, 2011).

El modelo hidrológico se basa en la ecuación general de balance hídrico (Arnold *et al.*, 1998):

$$SW_t = SW_{t-1} + \sum_{i=1}^t (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

SW_t : Contenido de agua en el suelo el día t (mm)

SW_{t-1} : Contenido de humedad en el suelo el día anterior (mm)

t : Tiempo (días)

R_i : Precipitación diaria (mm)

Q_i : Escorrentía diaria (mm)

ET_i : Evapotranspiración diaria (mm)

P_i : Percolación diaria (mm)

QR_i : Flujo de retorno o flujo base (mm)

4.5.1. Hidrología

La **escorrentía** o **escurrimiento superficial**, es el flujo que se produce a lo largo de una superficie inclinada. El volumen de escorrentía superficial se calcula con una modificación la ecuación de Curva Numérica del Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos de América o el Método de infiltración de Green y Ampt. El escurrimiento máximo se calcula a través del método racional modificado (Arnold *et al.*, 1998; Neitsch *et al.*, 2011).

La **evapotranspiración** es el agua que sale del suelo hacia la atmósfera por transpiración de las plantas y por evaporación del agua del suelo (Neitsch *et al.*, 2011). El modelo SWAT ofrece tres métodos para estimar la Evapotranspiración potencial: Penman-Monteith (Monteith, 1965), Hargreaves and Sammani (1985) y Priestley and Taylor (1972) citados por Arnold *et al.* (1998).

La **percolación** ocurre cuando se excede la capacidad de campo de una capa de suelo y la capa de abajo no está saturada, esta redistribución de agua se rige por la conductividad (Neitsch *et al.*, 2011). Para su cálculo utiliza una técnica de enrutamiento de almacenamiento combinada con un modelo de flujo de grietas para predecir el flujo a través de cada capa de suelo. Una vez que el agua se filtra por debajo de la zona radicular, se pierde de la cuenca, es decir se convierte en agua subterránea o aparece como flujo de retorno en las cuencas aguas abajo (Arnold *et al.*, 1998).

El **flujo de retorno** o **flujo base** es el volumen de agua que llega hasta el cauce de los canales naturales desde las aguas subterráneas. SWAT divide el agua subterránea en dos sistemas de acuíferos: un acuífero no confinado y poco profundo, que contribuye al flujo de retorno de las corrientes dentro de la cuenca y un acuífero profundo y confinado que contribuye al flujo de retorno de los afluentes fuera de la cuenca. Este flujo es el que mantiene el caudal de los ríos y quebradas en las épocas de baja precipitación (Neitsch *et al.*, 2011).

4.5.2. Clima

El clima de una cuenca hidrológica proporciona los aportes de humedad y energía que controlan el balance hídrico y determinan la importancia relativa de los diferentes componentes del ciclo hidrológico (Neitsch *et al.*, 2011). Las variables climáticas que utiliza SWAT para el balance son precipitación, temperatura del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Si las variables, diarias, están disponibles estas se ingresan directamente al modelo, sino, el generador de variables climáticas puede simularlas (Arnold *et al.*, 1998; Neitsch *et al.*, 2011)

4.5.3. Temperatura del suelo

La temperatura del suelo afecta el movimiento del agua y la tasa de descomposición de los residuos en el suelo. La temperatura media diaria del suelo se calcula en la superficie y el centro de cada capa. La temperatura de la superficie del suelo se calcula utilizando la temperatura máxima y mínima diaria, la cobertura de nieve, las plantas y los residuos para el día de interés más los cuatro días inmediatamente anteriores. La temperatura del suelo se simula para cada capa utilizando una función de profundidad de amortiguación, temperatura de la superficie y temperatura media anual del aire. La profundidad de amortiguación depende de la densidad aparente y del agua del suelo (Arnold *et al.*, 1998).

4.5.4. Erosión

La erosión y producción de sedimentos se estiman para cada HRU con la ecuación universal modificada de pérdida de suelo (MUSLE por sus siglas en inglés). Mientras la ecuación universal de pérdida de suelo (USLE por sus siglas en inglés) utiliza la lluvia como indicador de energía erosiva, MUSLE utiliza el escurrimiento (lámina y caudal) para simular la erosión y producción de sedimentos (Neitsch *et al.*, 2011).

4.5.5. Uso de suelo/crecimiento de cultivos

SWAT utiliza un modelo de crecimiento genérico para una planta, *single plant growth model*, para simular los tipos de coberturas del suelo. El modelo es capaz de diferenciar entre plantas anuales y perennes. Las plantas anuales crecen desde la fecha de siembra hasta la fecha de cosecha o hasta que las unidades de calor acumuladas sean iguales a las unidades de calor potenciales necesarias para una planta. Las plantas perennes mantienen su sistema de raíces durante todo el año, quedando inactivas en los meses de invierno. Reanudan el crecimiento cuando la temperatura promedio diaria del aire excede la temperatura mínima o básica requerida. El modelo de crecimiento de la planta se utiliza para evaluar la remoción de agua y nutrientes de la zona de la raíz, la transpiración y la producción de biomasa (Arnold *et al.*, 1998; Neitsch *et al.*, 2011).

4.5.6. Nutrientes

El modelo rastrea el movimiento y la transformación de varias formas de nitrógeno y fósforo en la cuenca. En el suelo, la transformación del nitrógeno de una forma a otra se rige por el ciclo del nitrógeno. La transformación del fósforo en el suelo es controlada por el ciclo del fósforo. Los nutrientes pueden introducirse en el canal principal y transportarse corriente abajo a través de la escorrentía superficial y el flujo subsuperficial lateral (Neitsch *et al.*, 2011).

4.5.7. Pesticidas

Aunque SWAT no simula el estrés en el crecimiento de una planta debido a la presencia de malezas, insectos dañinos y otras plagas, se pueden aplicar pesticidas a un HRU para estudiar el movimiento del producto químico en la cuenca. SWAT simula el movimiento de pesticidas en la red de drenaje a través de la escorrentía superficial (en solución y se absorbe en sedimentos transportados por la escorrentía), y en el perfil del suelo y el acuífero por percolación (en solución) (Neitsch *et al.*, 2011).

En el modelo se utiliza la tecnología GLEAMS para simular el transporte de pesticidas por escurrimientos, percolación, evaporación del suelo y sedimento. Los pesticidas se pueden aplicar en cualquier momento y se aplican al follaje de la planta o debajo de la superficie del suelo a cualquier profundidad. El índice de área foliar de la planta determina qué fracción del pesticida llega a la superficie del suelo. Además, una fracción de la tasa de aplicación (llamada eficiencia de aplicación) se pierde en la atmósfera. Cada pesticida tiene un conjunto único de parámetros que

incluyen solubilidad, vida media en el suelo y en el follaje, fracción de lavado, coeficiente de adsorción de carbono orgánico y costo. Los pesticidas en el follaje de las plantas y en el suelo se degradan exponencialmente de acuerdo con su vida media. El pesticida transportado por el agua y los sedimentos se calcula para cada evento de escorrentía y la lixiviación de pesticidas se estima para cada capa del suelo cuando se produce la percolación (Arnold *et al.*, 1998).

4.5.8. Manejo

SWAT permite al usuario definir las prácticas de gestión que tienen lugar en cada HRU. El usuario puede definir el comienzo y el final de la temporada de crecimiento, especificar el tiempo y las cantidades de fertilizantes, pesticidas y aplicaciones de riego, así como el tiempo de las operaciones de labranza. Al final de la temporada de crecimiento, la biomasa puede eliminarse de la HRU como rendimiento o colocarse en la superficie como residuo (Neitsch *et al.*, 2011).

4.6. Modelado de la cuenca del río Sordo con SWAT

Sánchez-Galindo (2015) y Sánchez-Galindo *et al.* (2017) utilizaron el modelo SWAT en la cuenca río Sordo, objeto del presente trabajo. Esta cuenca sedimentaria se escogió por los problemas de erosión hídrica que presenta (de 50 a 200 t ha⁻¹). El objetivo de dicho estudio fue calibrar y validar el modelo, para establecer parámetros útiles en evaluaciones hidrológicas y en la toma de decisiones. Para ello, los autores utilizaron diez años de información climática (de 1975 a 1985), se determinaron las propiedades físicas y químicas de nueve tipos de suelos y se definieron las variables fisiotécnicas de 13 tipos de cobertura vegetal presentes en la cuenca. Con base en datos topográficos, edáficos y cobertura vegetal, la cuenca se dividió en 175 subcuencas y 1 729 unidades de respuesta hidrológica. Para la calibración (c) y validación (v) se estimó el coeficiente de determinación (r^2) y el índice de eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE), entre valores observados y simulados para la producción anual de biomasa ($r^2 = 0.96$ c y NSE = 0.95 c), para caudales mensual ($r^2 = 0.84$ c, NSE = 0.83 c, $r^2 = 0.7$ v, y NSE = 0.81 v) y carga de sedimentos ($r^2 = 0.59$ c, NSE = 0.51 c, $r^2 = 0.58$ v, y NSE = 0.45 v).

4.7. Trabajos realizados con WEAP en México

En México el modelo WEAP ha sido implementado en, la subcuenca del río Zahuapan, Tlaxcala (Suárez *et al.*, 2009), la cuenca del río Guayalejo-Tamesí, Tamaulipas (Sánchez-Torres Esqueda, Ospina-Noreña, Gay-García, & Conde, 2011), el Valle de Galeana, Nuevo León (López-García

et al., 2017), la cuenca del río Conchos, Chihuahua, afluente de la cuenca binacional del río Bravo (Ingol-Blanco & McKinney, 2013), la cuenca binacional, México-EUA, del río Bravo (Sandoval-Solis *et al.*, 2011) y la cuenca alta del río Grijalva, localizada en México y Guatemala (Laino-Guanes *et al.*, 2017).

Ingol-Blanco & McKinney (2013) calibraron y validaron un modelo hidrológico en el río Conchos, afluente mexicano de la cuenca binacional, México-EUA, del río Bravo. El método manejado fue el de la humedad del suelo. Los resultados muestran, en la calibración mensual, un NSE = 0.84 y un $r = 0.95$, en la estación de Ojinaga y, un NSE = 0.81 y un $r = 0.91$ en La Boquilla, lo que indica un buen desempeño del modelo. Para la validación se utilizó un período de 10 años con condiciones de sequía. Los resultados muestran un NSE = 0.88 y un $r = 0.94$ en la estación de Ojinaga y un NSE = 0.60 y un $r = 0.84$ en La Boquilla.

Sandoval-Solis *et al.* (2011) estudiaron la cuenca binacional río Bravo (llamada río Grande en EUA). Obteniendo un NSE = 0.825 en los depósitos de almacenamiento en México y un NSE = 0.805 en Estados Unidos de América. También se compararon datos de escurrimientos medidos y simulados de 4 estaciones a lo largo del río Bravo y 6 estaciones en ríos tributarios. Para los 4 puntos de control en el río Grande se obtuvieron valores de NSE > 0.297 y en los 6 tributarios se lograron NSE > 0.536. La diferencia entre los datos medidos y los simulados es mayor en periodos secos.

4.8. Trabajos realizados con WEAP en el mundo

WEAP se ha aplicado en evaluaciones del recurso hídrico en docenas de países, incluyendo: los Estados Unidos, México, Brasil, Alemania, Ghana, Burkina Faso, Kenia, Sudáfrica, Mozambique, Egipto, Israel, Omán, Asia Central, India, Sri Lanka, Nepal, China, Corea del Sur, y Tailandia (<http://www.weap21.org>). La primera gran aplicación del modelo fue en la región del Mar Aral en 1989 con el patrocinio del Instituto de Medio Ambiente de Estocolmo (*Stockholm Environment Institute*, SEI) (Sieber & Purkey, 2015).

Varela-Ortega *et al.* (2016) emplearon el modelo WEAP en la cuenca del río Guadiana, España, para conocer su comportamiento hidrológico. En esta cuenca, con condiciones climáticas áridas, se calibró el modelo para el periodo 1971-1990 obteniendo valores de NSE > 0.7 y PBIAS < 20%. En otro estudio, para evaluar la calidad del agua en la cuenca del río Bagmati, Nepal, Mishra *et al.*

(2017) utilizaron el modelo WEAP para simular flujos mensuales del periodo 2001-2014. De la comparación, con los caudales observados en la estación hidrométrica Chovar, se obtuvo un NSE de 0.94.

Olsson *et al.* (2017) utilizaron el método de la humedad del suelo de WEAP en la cuenca fluvial costera de Chancay-Huaral en la región de Lima, Perú. El modelo fue calibrado, 1969-1978, y validado, 1979-2012 con datos climáticos e hidrométricos de estaciones SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú). La comparación entre valores mensuales simulados y observados alcanzó un NSE = 0.80 y 0.82, $r^2 = 0.83$ y 0.79, y PBIAS = -9% y -4% para calibración y validación, respectivamente. El modelo se desempeñó mejor durante la validación.

En la provincia de Guanacaste, Costa Rica, Hund, Allen, Morillas, & Johnson (2018) manejaron el método de la humedad del suelo del modelo WEAP para conocer la cantidad de agua que se recarga en los acuíferos de esa provincia. El modelo se calibró (julio de 2014 a diciembre de 2016) y se evaluó con NSE, r^2 , el coeficiente de correlación Pearson (r) y la raíz del error cuadrático medio (RSR, *root mean square error*). El ajuste diario del modelo presentó durante la calibración valores de NSE entre 0.25 y 0.61, y r^2 entre 0.27 y 0.61.

Höllermann, Giertz, & Diekkrüger (2010) recurrieron al modelo WEAP en la cuenca Ouémé-Bonou, Benín, para analizar la situación del recurso agua bajo diferentes escenarios socio-económicos. El modelo se calibró con los datos mensuales medidos de la estación Terou-Ibomakoro durante el periodo 2003-2004, obteniéndose un NSE = 0.91 y un $r^2 = 0.92$. La validación se efectuó con datos de la estación hidrométrica Bonou, periodo 1980-2002, logrando los valores NSE = 0.78 y $r^2 = 0.83$.

El modelo WEAP fue utilizado en la cuenca Okanagan, Canadá por Conrad & Yates (2018) para predecir la demanda de agua y sus posibles estrategias de manejo. La eficiencia del modelo para estimar flujos y almacenamiento en embalses, mensuales en el año 2010, alcanzó un r^2 que osciló entre 0.22 y 0.73 para el almacenamiento en los lagos y, entre 0.75 y 0.95 para los caudales.

Flores-López, Galaitsi, Escobar, & Purkey (2016) analizaron con el método de la humedad del suelo de WEAP el sistema hidrológico de la cuenca Quiroz-Chipillico, de la región Piura, Perú, que se caracteriza por la presencia de páramos (humedales) que proporcionan agua a los ríos. Los

flujos medidos estuvieron disponibles para la calibración del 30 de octubre de 2008 al 4 de septiembre de 2010. La subcuenca Páramo, a nivel diario, obtuvo un NSE = 0.25, PBIAS = -0.62% y $r^2 = 0.24$. En la subcuenca Toma Samba, la calibración mensual, 2000-2011, alcanzó un NSE = 0.83, PBIAS = -0.47% y $r^2 = 0.84$, mientras la subcuenca Chipillico logró un NSE = 0.86, PBIAS = 13.8 y $r^2 = 0.88$. Según los índices de eficiencia, WEAP es mejor para estimar caudales mensuales que diarios.

Maliehe & Mulungu (2017) estimaron la cantidad de agua superficial en la cuenca del sur de Phuthiatsana, Lesoto, con los modelos SWAT y WEAP. Para la calibración de flujos mensuales con SWAT, entre 1981 y 2001, estación CG024, alcanzaron un NSE de 0.59 y un r^2 de 0.59. La validación comprendió el periodo 2002-2013 y resultó con un NSE de 0.52 y un r^2 de 0.66. Con el modelo WEAP se caracterizó el sistema hidrológico de la cuenca para los sitios de demanda de agua y los de almacenamiento (localización, reglas de operación, balance de agua de SWAT y capacidad de las presas), estaciones de aforo (escurrimientos – incluyendo flujos generados por SWAT y reservas ecológicas), caudales de los ríos. El modelo WEAP fue calibrado usando las estaciones hidrométricas CG024 y CG084, y las demandas históricas. Para la calibración de la estación CG024 (1972-2002) se obtuvo un NSE = 0.72 y un $r^2 = 0.84$ y para la validación (2003-2014) un NSE = 0.73 y un $r^2 = 0.74$. Para la calibración de la estación hidrométrica CG084 (2007-2011) se reporta un NSE = 0.55 y un $r^2 = 0.64$ y para la validación (2012-2014) un NSE = 0.63 y $r^2 = 0.89$.

Adgolign *et al.* (2016) emplearon WEAP y SWAT en la subcuenca Didessa, Etiopía. Con WEAP evaluaron el avance del agua sobre el río y su disponibilidad en la parte baja, además identificaron sitios susceptibles a escasez de agua superficial. SWAT se utilizó para aportar los datos de escurrimiento medio mensual. Para ello SWAT se calibró (1982-1986), alcanzando valores de NSE y r^2 de 0.87, y se validó (1992-1996), NSE y r^2 de 0.8.

Hussen, Mekonnen, & Pingale (2018) usaron los modelos SWAT y WEAP en la cuenca del río Bilate, en el valle del Rift, Etiopía, para conocer el comportamiento actual y posibles escenarios futuros del sistema hidrológico. Primero, evaluaron de manera satisfactoria la capacidad de SWAT para reproducir escurrimientos mensuales durante la calibración, 2003-2007, (NSE = 0.755 y $r^2 = 0.77$) y la validación, 2008-2010, (NSE = 0.778 y $r^2 = 0.798$). Posteriormente, emplearon el modelo

WEAP para la asignación de recursos hídricos, sin reportar datos de calibración y validación, bajo diferentes escenarios hidrológicos.

Faiz *et al.* (2018) evaluaron el desempeño de los modelos hidrológicos, SWAT, WEAP, *Nedbor Afstromnings Model (NAM)*, *Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV)* y *Génie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J)*, para simular escurrimientos usando modelos de circulación general en la cuenca del río Songhua, China. Durante la calibración mensual (1988-2010) WEAP obtuvo un $NSE = 0.83$ y un $r^2 = 0.86$ mientras que SWAT alcanzó un $NSE = 0.81$ y un $r^2 = 0.82$. Con la validación, mensual, (2011-2016) los valores fueron $NSE = 0.88$ y $r^2 = 0.92$ para WEAP, y $NSE = 0.80$ y $r^2 = 0.81$ para SWAT.

4.9. WEAP vs. SWAT

Tanto WEAP como SWAT se han utilizado para simular escurrimientos en diversas cuencas del mundo con resultados satisfactorios (Cuadro 1), cabe destacar que no existe una diferencia estadística en los valores de NSE y r^2 que indique que un modelo tiene mejor poder predictivo sobre el otro. El paso de tiempo mensual para la simulación de escurrimientos es el más utilizado en estos dos modelos y en general el poder predictivo de ambos modelos es superior durante el periodo de calibración.

Cuadro 1. Valores de índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y coeficiente de determinación (r^2) de los modelos WEAP y SWAT en algunas cuencas de México y el mundo.

| Autor | Modelo | Cuenca | Tiempo | Calibración | | | Validación | | | | | | | | |
|-------------------------------------|--------|---------------------------------|---------|-----------------------|-----------|-----------|------------|------|-------|-----------|------|------|-----------|------|------|
| | | | | Periodo | NSE | r^2 | Periodo | NSE | r^2 | | | | | | |
| Ingol-Blanco & McKinney (2013) | WEAP | Río Conchos (México) | Mensual | 1980-1989 | 0.84 | 0.95 | 1990-1999 | 0.88 | 0.94 | | | | | | |
| | | -Ojinaga | | | 0.81 | 0.91 | | 0.60 | 0.84 | | | | | | |
| Sandoval-Solis <i>et al.</i> (2011) | WEAP | Río Bravo (México-EUA) | Mensual | 10/1978-09/1993 | > 0.297 | - | - | - | - | | | | | | |
| | | -Río principal | | | > 0.536 | - | | - | | | | | | | |
| Olsson <i>et al.</i> (2017) | WEAP | Chancay-Huaral (Perú) | Mensual | 1969-1978 | 0.8 | 0.83 | 1979-2012 | 0.82 | 0.79 | | | | | | |
| Hund <i>et al.</i> (2018) | WEAP | Potrero y Caimital (Costa Rica) | Diario | 07/2014-12/2016 | 0.25-0.61 | 0.27-0.61 | - | - | - | | | | | | |
| Höllermann <i>et al.</i> (2010) | WEAP | Ouéomé-Bonou (Benín) | Mensual | 2003-2004 | 0.91 | 0.92 | 1980-2002 | 0.78 | 0.83 | | | | | | |
| Flores-López <i>et al.</i> (2016) | WEAP | Quiroz-Chipillico (Perú) | Diario | 30/10/2008-04/09/2010 | 0.25 | 0.24 | - | - | - | | | | | | |
| | | Páramo | | | - | - | | | | | | | | | |
| | | Toma Samba | Mensual | 2000-2011 | 0.83 | 0.84 | - | - | | | | | | | |
| Maliehe & Mulungu (2017) | SWAT | South Phuthiatsana (Lesoto) | Mensual | 1981-2001 | 0.59 | 0.59 | 2002-2013 | 0.52 | 0.66 | | | | | | |
| | WEAP | CG024 | | | | | | | | 1972-2002 | 0.72 | 0.84 | 2003-2014 | 0.73 | 0.74 |
| | | CG084 | | | | | | | | 2007-2011 | 0.55 | 0.64 | 2012-2014 | 0.63 | 0.89 |
| Hussen <i>et al.</i> (2018) | SWAT | Río Bilate (Etiopía) | Mensual | 2003-2007 | 0.75 | 0.77 | 2008-2010 | 0.78 | 0.8 | | | | | | |
| | SWAT | | | | 0.81 | 0.82 | | 0.80 | 0.81 | | | | | | |
| Faiz <i>et al.</i> (2018) | | Río Songhua (China) | Mensual | 1988-2010 | 0.83 | 0.86 | 2011-2016 | 0.88 | 0.92 | | | | | | |
| | WEAP | | | | | | | | | | | | | | |

El Cuadro 1 tiene el propósito de ligar el marco teórico y justificar la metodología empleada en la presente investigación. En algunos estudios se ha calibrado y validado SWAT y sus resultados se han utilizado para alimentar escenarios en WEAP. Entre estos trabajos existe el consenso de que SWAT demanda mayor información que WEAP.

4.10. Indicadores de eficiencia

La evaluación del comportamiento y el desempeño de los modelos se realizan comparando las variables simuladas con las observadas. En los modelos hidrológicos se comparan el escurrimiento simulado y el escurrimiento medido en la salida del área de captación. En el enfoque de modelación hidrológica distribuida, se integran comparaciones adicionales de mediciones simuladas y observadas para valorar el desempeño general del modelado. En ambos enfoques, de respuesta única y múltiple, los hidrólogos utilizan comúnmente los criterios de eficiencia para proporcionar una evaluación objetiva de la "cercanía" del comportamiento simulado a las mediciones observadas (Krause, Boyle, & Bäse, 2005).

Hay varias razones por las que los hidrólogos y otros científicos necesitan evaluar el desempeño de un modelo, (1) para proporcionar una estimación cuantitativa de la capacidad del modelo para reproducir el comportamiento histórico y futuro de la cuenca, (2) proporcionar un medio para evaluar las mejoras del enfoque de modelado mediante el ajuste de los parámetros del modelo, la inclusión de información adicional observada y la representación de importantes características espaciales y temporales de la cuenca y (3) para comparar los esfuerzos de modelado actuales con los resultados de estudios anteriores (Krause *et al.*, 2005).

4.10.1. Coeficiente de determinación (r^2)

Describe la variación de los datos observados con respecto a los simulados por el modelo (Ecuación 6). El rango de r^2 varía de 0 a 1, los valores más altos indican un menor error de variación. Este estadístico se ha utilizado ampliamente para la evaluación de modelos sin embargo es demasiado sensible a los valores extremos altos e insensible a las diferencias aditivas y proporcionales entre las predicciones del modelo y los datos medidos (Moriassi *et al.*, 2007).

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (Yobs_i - \bar{Yobs})(Ysim_i - \bar{Ysim})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Yobs_i - \bar{Yobs})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Ysim_i - \bar{Ysim})^2}} \right)^2 \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

$Yobs_i$: Valor observado

$\bar{Y}obs$: Valor medio observado

$Ysim_i$: Valor simulado

$\bar{Y}sim$: Valor medio simulado

n : Número total de observaciones

4.10.2. Índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE)

El índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE) es un estadístico normalizado toma valores comprendidos entre $-\infty$ y 1. Este determina la magnitud relativa de la varianza residual ("ruido") en comparación con la variación de los datos medidos ("información"). NSE indica qué tan bien la gráfica de datos observados versus simulados se ajusta a la línea 1:1.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Yobs_i - Ysim_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Yobs_i - \bar{Y}obs)^2} \right] \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

$Yobs_i$: Valores observados

$Ysim_i$: Valores simulados por el modelo

$\bar{Y}obs$: Media de los valores observados

n : Número total de observaciones

Este índice produce resultados menores o iguales a 1, si el resultado es 1 el ajuste es perfecto, si es 0 el error es del mismo orden de magnitud que la varianza de los datos observados; por lo que la media de los datos observados tendrá una capacidad de predicción similar al modelo. Valores inferiores a cero implican que la media tiene una capacidad de predicción más alta que el modelo, lo que implica que los valores simulados son malos (Moriassi *et al.*, 2007).

4.10.3. Sesgo porcentual (PBIAS)

El sesgo porcentual (PBIAS) calcula la tendencia del modelo a subestimar (valores positivos) o sobreestimar (valores negativos) la variable de interés. Los valores de baja magnitud indican una simulación precisa del modelo, siendo el 0 el número óptimo (Moriassi *et al.*, 2007).

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Yobs_i - Ysim_i) * (100)}{\sum_{i=1}^n Yobs_i} \right] \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

PBIAS: Desviación de los datos evaluados (%)

Yobs_i: Valor observado

Ysim_i: Valor simulado por el modelo

n: Número total de observaciones

Cuadro 2. Clasificaciones de eficiencia Nash-Sutcliffe y porcentaje BIAS para el cálculo de escurrimientos mensuales.

| Clasificación de eficiencia | NSE | PBIAS (%) |
|------------------------------------|------------------------|---------------------------|
| Muy bueno | $0.75 < NSE \leq 1.00$ | $PBIAS < \pm 10$ |
| Bueno | $0.65 < NSE \leq 0.75$ | $\pm 10 < PBIAS < \pm 15$ |
| Satisfactorio | $0.50 < NSE \leq 0.65$ | $\pm 15 < PBIAS < \pm 25$ |
| Insatisfactorio | $NSE \leq 0.50$ | $PBIAS > \pm 25$ |

Fuente: Moriassi *et al.* (2007).

5. MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se efectuó en la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México, sitio previamente analizado con el modelo SWAT por Sánchez-Galindo (2015) y Sánchez-Galindo *et al.* (2017), este último calibrado de manera automática con el software SWAT-CUP (*Calibration and Uncertainty Programs*). La caracterización que se presenta a continuación corresponde al trabajo referenciado anteriormente, incluyendo mapas. Además los datos de vegetación, clima, suelo e hidrometría, y resultados de la investigación antes mencionada son la base del presente trabajo.

5.1. Caracterización biofísica del área de estudio

La cuenca del río Sordo se localiza entre las coordenadas 17° 37' 19.93" y 16° 29' 43.11" de latitud norte y entre los 98° 05' 54.34" y 96° 53' 17.86" de longitud oeste. Comprende una superficie de 7 751.42 km² y tiene su desembocadura en la estación hidrométrica Ixtlayutla (Figura 4). Abarca 108 municipios, 106 del estado de Oaxaca y 2 del estado de Guerrero, y 1,285 localidades.

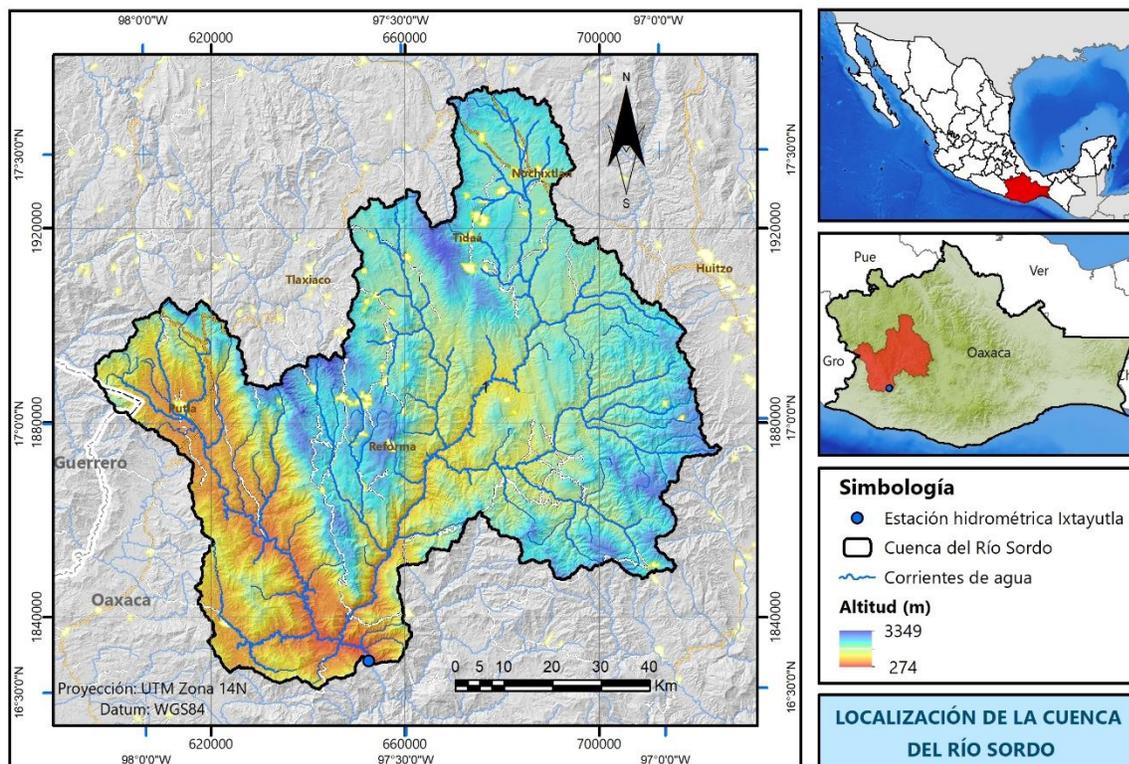


Figura 4. Localización de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México.

La cuenca comprende tres subprovincias fisiográficas: la cordillera costera del sur (46.4%), la mixteca alta (27.8%) y sierras centrales de Oaxaca (25.8%). Esta área abarca cuatro regiones culturales: Mixteca (54.4%), Sierra Sur (30.6%), Valles Centrales (11.7%) y Costa (3.3%). Los climas característicos en la cuenca son el templado húmedo y subhúmedo (48.6%), semiseco templado (1.1%), cálido subhúmedo (16%) y semicálido subhúmedo (34%). La geología de la cuenca se compone principalmente de rocas sedimentarias tipo calizo (50%), metamórficas (24%), ígneas intrusivas (16.4%) e ígneas extrusivas (9.2%). La cuenca se sitúa sobre dos acuíferos: Nochixtlán con 1 321.84 km² que presentó una recarga media anual de 68.5 hm³ en el año 2016 y Jamiltepec con 6 269.18 km², y una recarga media anual de 61.3 hm³ año⁻¹ en el año 2004.

5.1.1. Precipitación

La precipitación media anual de la cuenca del río Sordo, con base en el método de polígonos de Thiessen y la información de la base de datos climatológica nacional de 1961 al 2000, es de 1,229 mm. En la cuenca se presentan precipitaciones de 400 mm en el norte que se incrementan hasta 1600 mm en la parte sur (Figura 5); donde se encuentran los municipios de Santiago Ixtlayutla y Santa María Zacatepec.

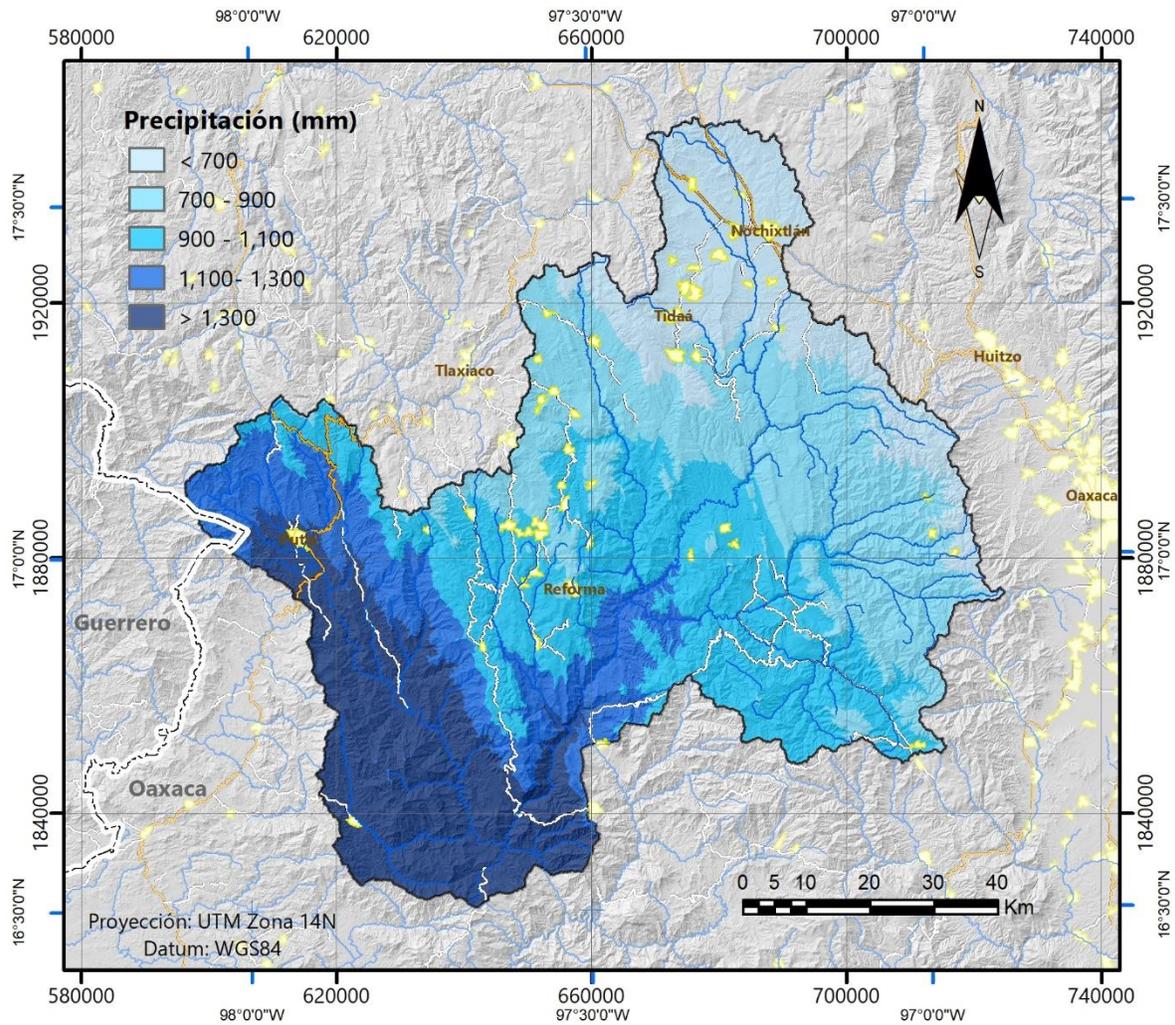


Figura 5. Distribución de la precipitación media anual en la cuenca del río Sordo.

La Figura 6 muestra el comportamiento de la precipitación media mensual de tres estaciones meteorológicas representativas de la cuenca, ubicadas al norte (Asunción Nochixtlan, 20076), centro (Villa Chalcatongo, 20178) y sur (Ixtayutla, 20038); donde se observa que el periodo de lluvias se presenta entre mayo y octubre, presentándose precipitación máximas en los meses de junio y septiembre.

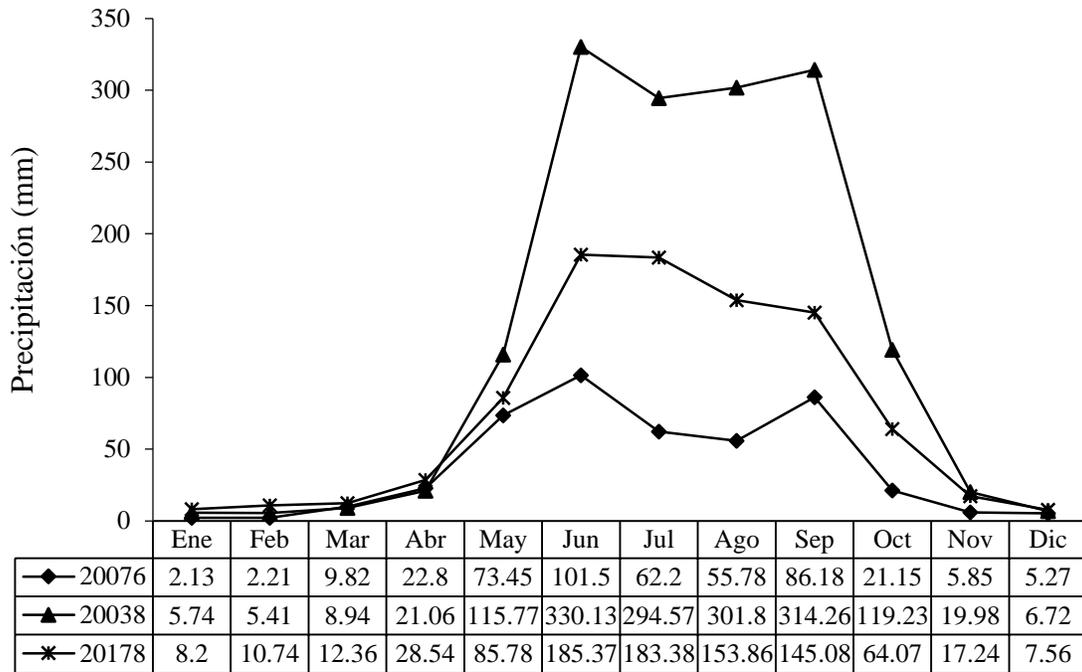


Figura 6. Precipitación media mensual de tres estaciones meteorológicas.

5.1.2. Temperatura

La cuenca registra temperaturas medias anuales que oscilan entre los 10 °C y 28 °C (Figura 7). Las temperaturas más bajas se presentan en regiones con elevaciones que van de los 2,200 a 3,348 msnm, como Santiago Tlazoyaltepec, San Juan Diuxi, San Esteban Atlatlahuaca, entre otras. Las temperaturas más altas se presentan en regiones con menor altitud como Santiago Ixtayutla, La Reforma, Putla Villa de Guerrero, entre otras.

En la Figura 8 se observa el comportamiento de la temperatura media mensual de tres estaciones con elevaciones representativas de la cuenca: Villa Chalcatongo (20178) con 2428 msnm, Ixtayutla (20038) con 610 msnm y Santa María Yucuhitia (20130) con 1876 msnm.

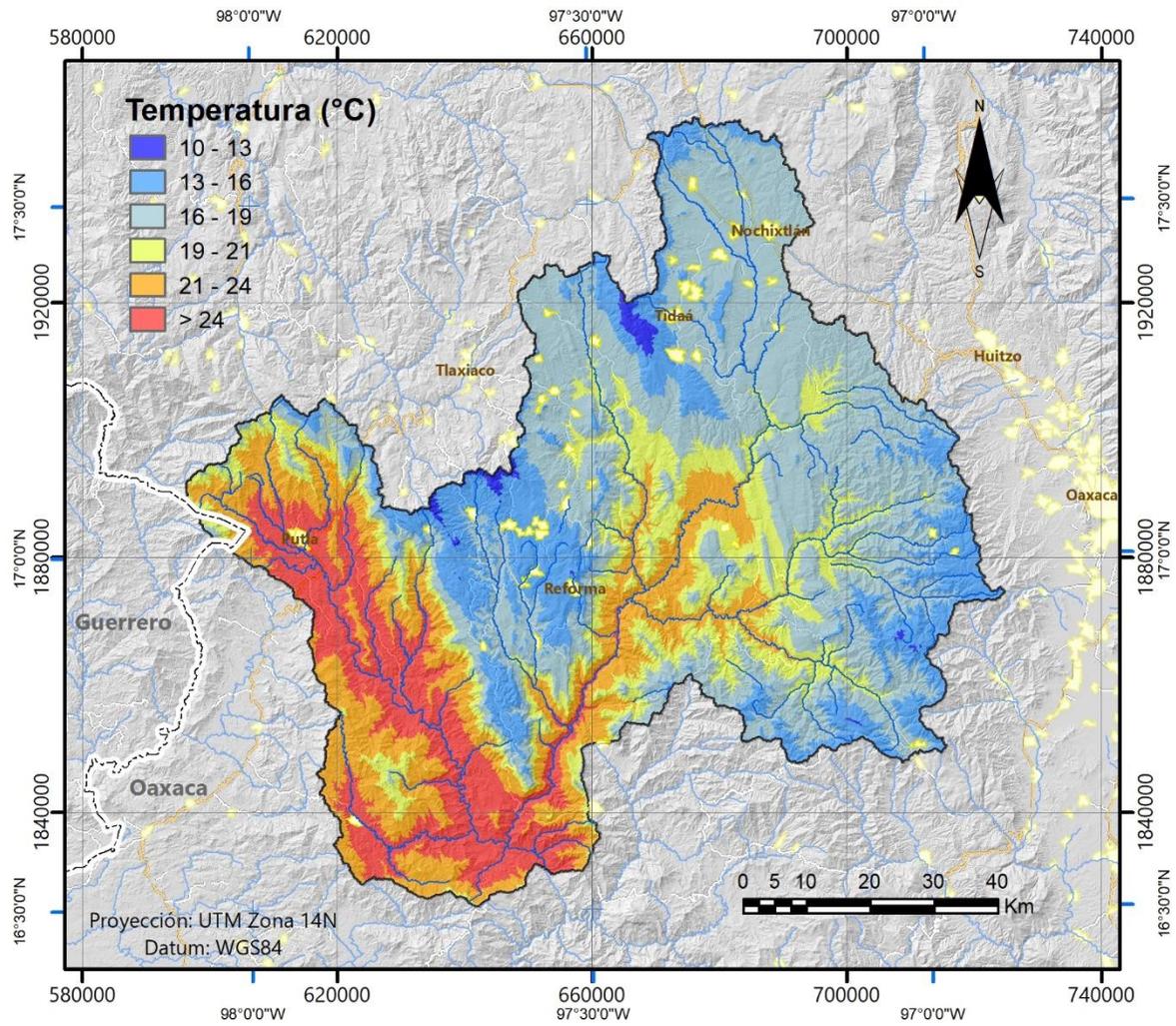


Figura 7. Distribución de la temperatura media anual de la cuenca del río Sordo.

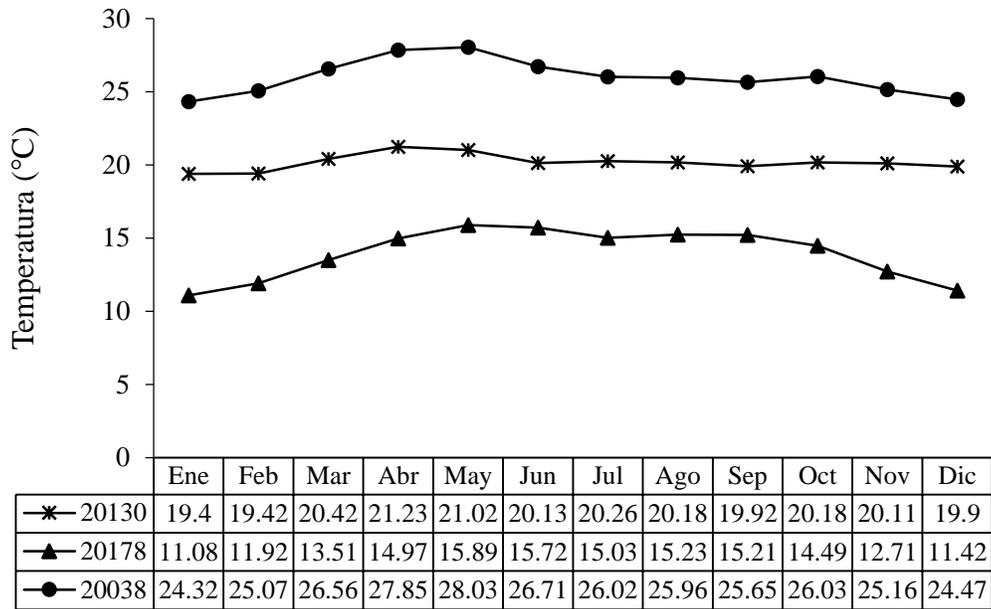


Figura 8. Temperatura media mensual de tres estaciones meteorológicas.

5.1.3. Suelos

En la cuenca del río Sordo se localizan 9 tipos de suelo (Figura 9) de acuerdo con la serie II edafológica del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e informática modificada por Sánchez-Galindo (2015). El suelo con mayor proporción es el cambisol (22%) y se ubica básicamente al este, en el oeste de la cuenca también se observa una franja a un lado de suelos acrisoles. En el sector oeste de la cuenca se encuentra en mayor superficie el acrisol (15.4%). Los litosoles, rendzinas y regosoles son los suelos con una amplia distribución en la cuenca (31%) que son por lo general someros y por tanto no aptos para la agricultura. Los suelos más aptos para la producción agrícola son los phaeozems (lomeríos) y vertisoles (valles), estos se localizan principalmente al norte y centro de la cuenca ocupan el 17.2% de la superficie.

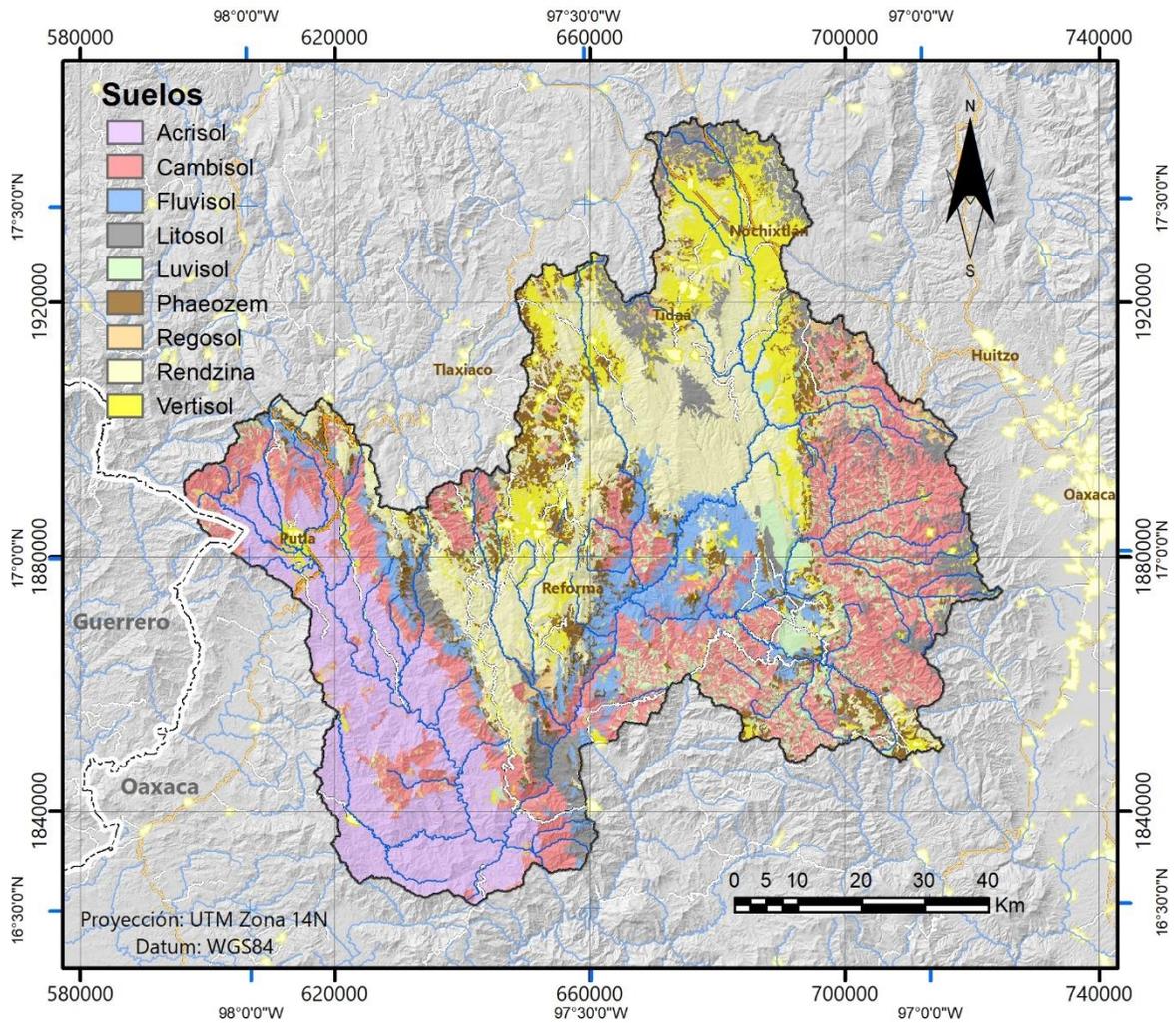


Figura 9. Suelos de la cuenca del río Sordo (Sánchez-Galindo, 2015).

Cuadro 3. Suelos presentes en la cuenca del río Sordo.

| Clave | Descripción | Superficie (ha) | Superficie (%) |
|----------------------|-------------|------------------|----------------|
| AC | Acrisol | 119619.91 | 15.4 |
| CM | Cambisol | 170825.80 | 22.0 |
| EL | Rendzina | 157214.30 | 20.3 |
| FL | Fluvisol | 58019.38 | 7.5 |
| Hc | Phaeozem | 52252.32 | 6.7 |
| Is | Litosol | 59585.17 | 7.7 |
| Lc | Luvisol | 53128.23 | 6.9 |
| Re | Regosol | 23665.09 | 3.1 |
| Vc | Vertisol | 80831.81 | 10.4 |
| Total general | | 775142.01 | 100 |

5.1.4. Uso de suelo y vegetación

La cuenca del río Sordo presenta un total 13 principales usos de suelo y vegetación (Figura 10), tomando como base la capa vectorial de uso de suelo y vegetación generada a través de imágenes de satélite Landsat con resolución de 15 m y verificación en campo (WWF, 2014b), y el Conjunto nacional de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación a escala 1:250,000 serie V (INEGI, 2014) citados por (Sánchez-Galindo, 2015). Así, el 61.5% de la cuenca está cubierto por algún tipo bosque, un 18.5% por pastizales y aproximadamente el 11% por agricultura (Cuadro 4).

Cuadro 4. Uso de suelo y vegetación de la cuenca del río Sordo.

| Clave | Descripción | Superficie (ha) | Superficie (%) |
|----------------------|------------------------------|------------------------|-----------------------|
| BENC | Bosque de encino | 120901.9 | 15.6 |
| ENPI | Bosque de encino-pino | 10253.76 | 1.3 |
| FRSD | Selva baja caducifolia | 49401.51 | 6.4 |
| FRSE | Bosque mesófilo de montaña | 5359.4 | 0.7 |
| MATO | Chaparral | 16269.98 | 2.1 |
| PASI | Pastizal | 143755.72 | 18.5 |
| PIEN | Bosque de pino-encino | 179160.24 | 23.1 |
| PINO | Bosque de pino | 159326.96 | 20.6 |
| RIEG | Agricultura de riego | 974.39 | 0.1 |
| RNGB | Bosque de táscate | 1823.12 | 0.2 |
| TEMP | Agricultura de temporal | 82926.75 | 10.7 |
| UMRD | Residencial mediana densidad | 3843.14 | 0.5 |
| WATR | Cuerpos de agua | 1145.13 | 0.1 |
| Total general | | 775142.01 | 100 |

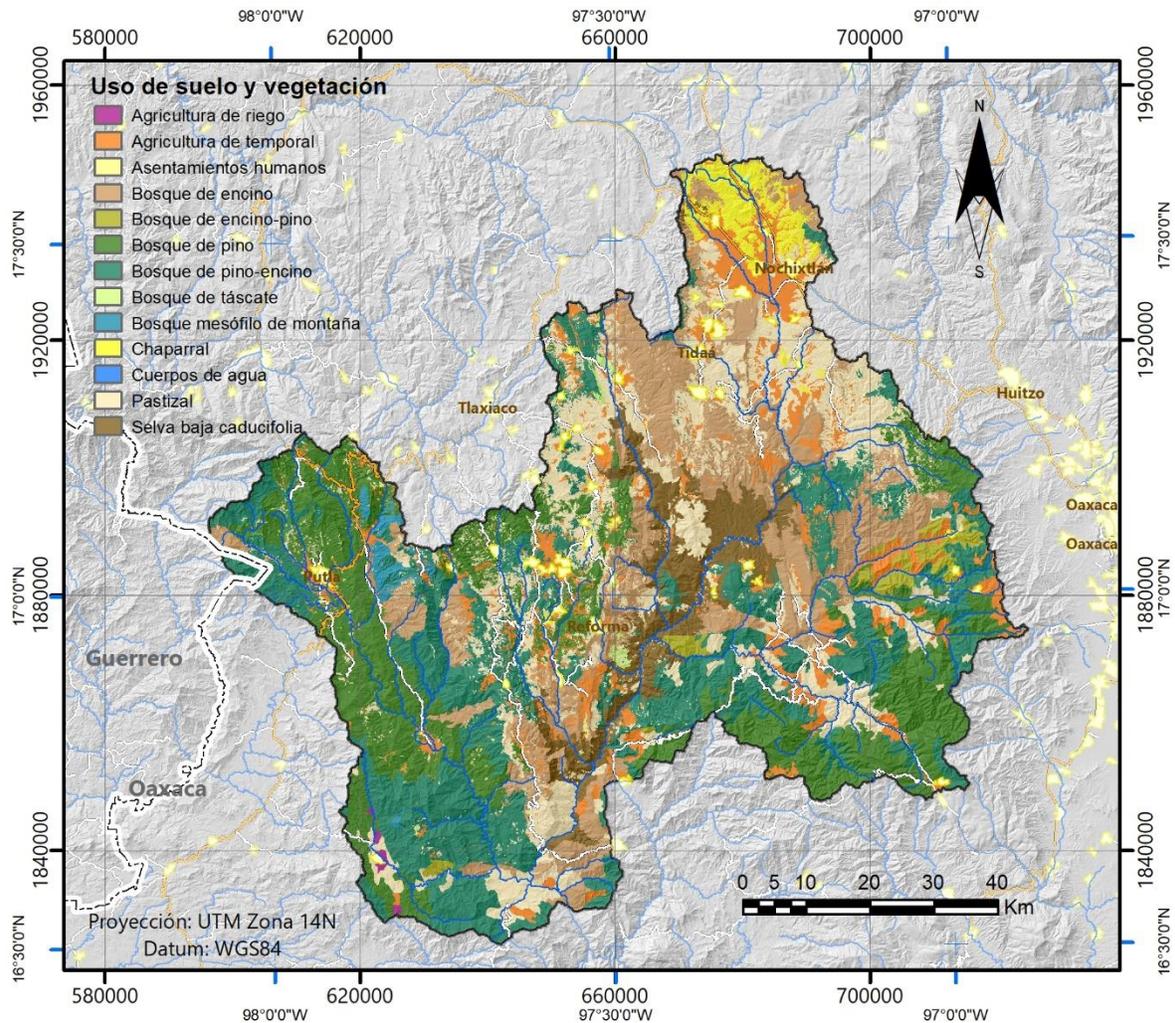


Figura 10. Uso de suelo y vegetación de la cuenca del río Sordo (WWF, 2014).

5.1.5. Hidrología

La cuenca del río Sordo se ubica dentro de la región hidrológica No. 20, Costa Chica de Guerrero, y dentro de la región hidrológico administrativa V, Pacífico Sur. En la cuenca confluyen varios ríos, los más importantes por su dimensión son el Peñoles, La Labor, La Cuchara, Zapote, Yolotepec y el Sordo. El río Sordo-Yolotepec desemboca en la estación hidrométrica Ixtlayutla (20021), donde se cerró la cuenca para este estudio (Figura 11). La estación hidrométrica Ixtayutla, que dejó de operar en 1991, se localiza en el municipio de Santiago Ixtayutla, a 10 km al oriente de la población con el mismo nombre y 8 km aguas arriba de la unión de los ríos Yolotepec y Verde.

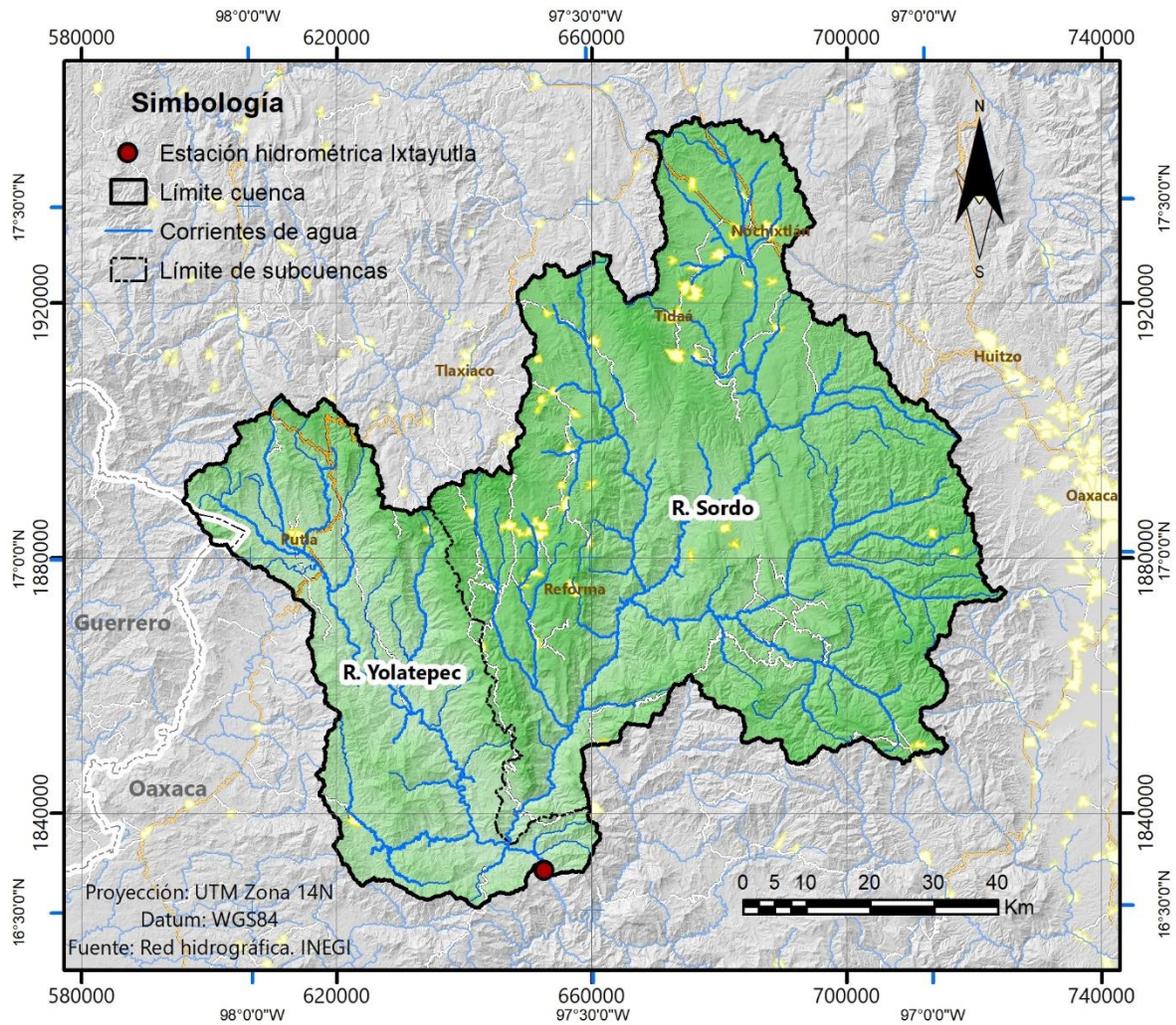


Figura 11. Red fluvial de la cuenca del río Sordo.

5.2. Metodología

Para realizar este trabajo se siguió la metodología mostrada en la Figura 12. En este esquema se observa como primer paso la creación del esquema en el modelo WEAP, cabe destacar que previamente se decidió el método de la humedad del suelo de WEAP.

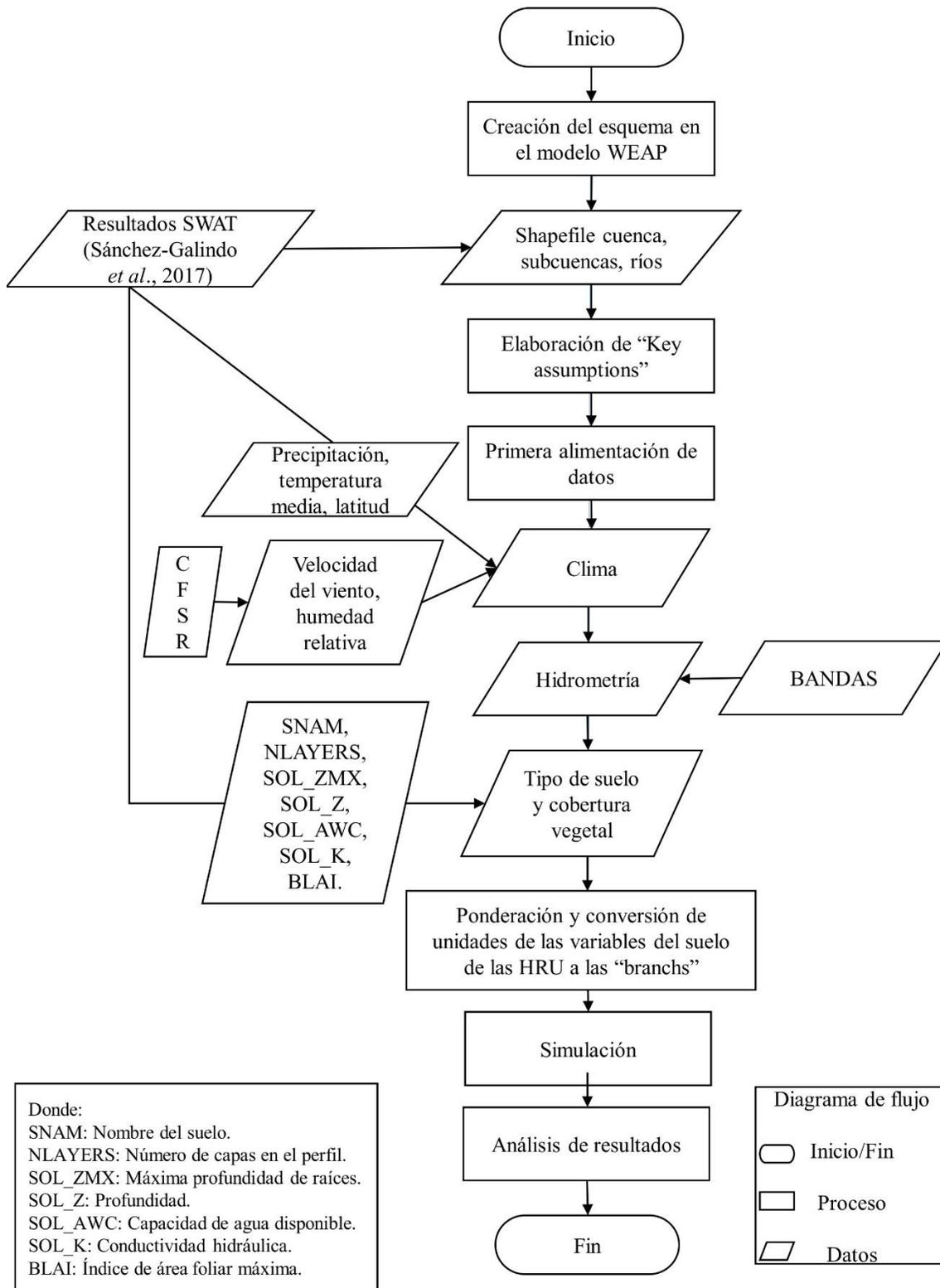


Figura 12. Metodología utilizada en el modelo WEAP.

5.2.1. Selección del método

La herramienta WEAP simula los componentes (naturales e intervenidos) de los sistemas de recursos hidrológicos, es un modelo híbrido conceptual-base física y de un número reducido de parámetros, está bien documentado, ha sido aplicado en cuencas de diversos tamaños en diferentes regiones y es adecuado para la evaluación de escenarios (Hernández-Vargas, 2017).

WEAP posee cinco métodos, (1) Método de lluvia-escorrentamiento y (2) Método de demandas de riego, son versiones del enfoque de coeficiente simplificado; (3) Método de la humedad del suelo, (4) Método MABIA y (5) Modelo de crecimiento de plantas (Sieber & Purkey, 2015).

En el presente trabajo se recurrió al Método de la humedad del suelo (*Rainfall Runoff Method-Soil Moisture Method*). Es el más complejo de los cinco y representa a la cuenca a través de dos capas de suelo. Mediante funciones empíricas describe la evapotranspiración, escorrentamiento superficial, escorrentamiento subsuperficial y percolación profunda. Este método permite la caracterización del uso de suelo y vegetación o tipos de suelos impactados por estos procesos (Sieber & Purkey, 2015; Yates *et al.*, 2005).

5.2.2. Delimitación del área y años de estudio

La delimitación de la cuenca del río Sordo, en la escala espacial, se efectuó con la creación de un esquema. Este se conformó por 175 subcuencas, la red fluvial y la estación hidrométrica 20021 “Ixtayutla” (Figura 13). Se creó el sistema utilizando como base el tutorial (*Stockholm Environment Institute*, 2016) y el manual de usuario (Sieber & Purkey, 2015). Los datos vectoriales generados en SWAT por Sánchez-Galindo (2015) y Sánchez-Galindo *et al.* (2017) fueron los incorporados a WEAP, metodología también empleada por Chinnasamy *et al.* (2015).

Es importante mencionar que las actualizaciones de WEAP desde el año 2018 permiten la delimitación automática de cuencas y ríos, desagregar la superficie en áreas homogéneas por elevación y cobertura, y descargar datos históricos del clima para cada cuenca (por banda de elevación). Sin embargo se optó por recrear los parámetros resultantes de la calibración de SWAT a fin de mantener la mayor similitud posible entre ambos modelos.

La escala temporal corresponde a los años base y final del periodo de modelación. La limitación temporal se realiza con base en la coincidencia de los registros climatológicos e hidrométricos (Hernández-Vargas, 2017).

Sánchez-Galindo *et al.* (2017) utilizaron el periodo de 1975 a 1985 para la calibración y validación del modelo SWAT, siendo el primer año el de entrenamiento, los cinco posteriores, 1976 a 1981, los de calibración y los últimos cuatro, 1982 a 1985, los de validación. Para la modelación de WEAP se tomó el mismo periodo, siendo 1975 el año base, y los restantes, 1976 a 1985, el periodo para evaluar la eficiencia.

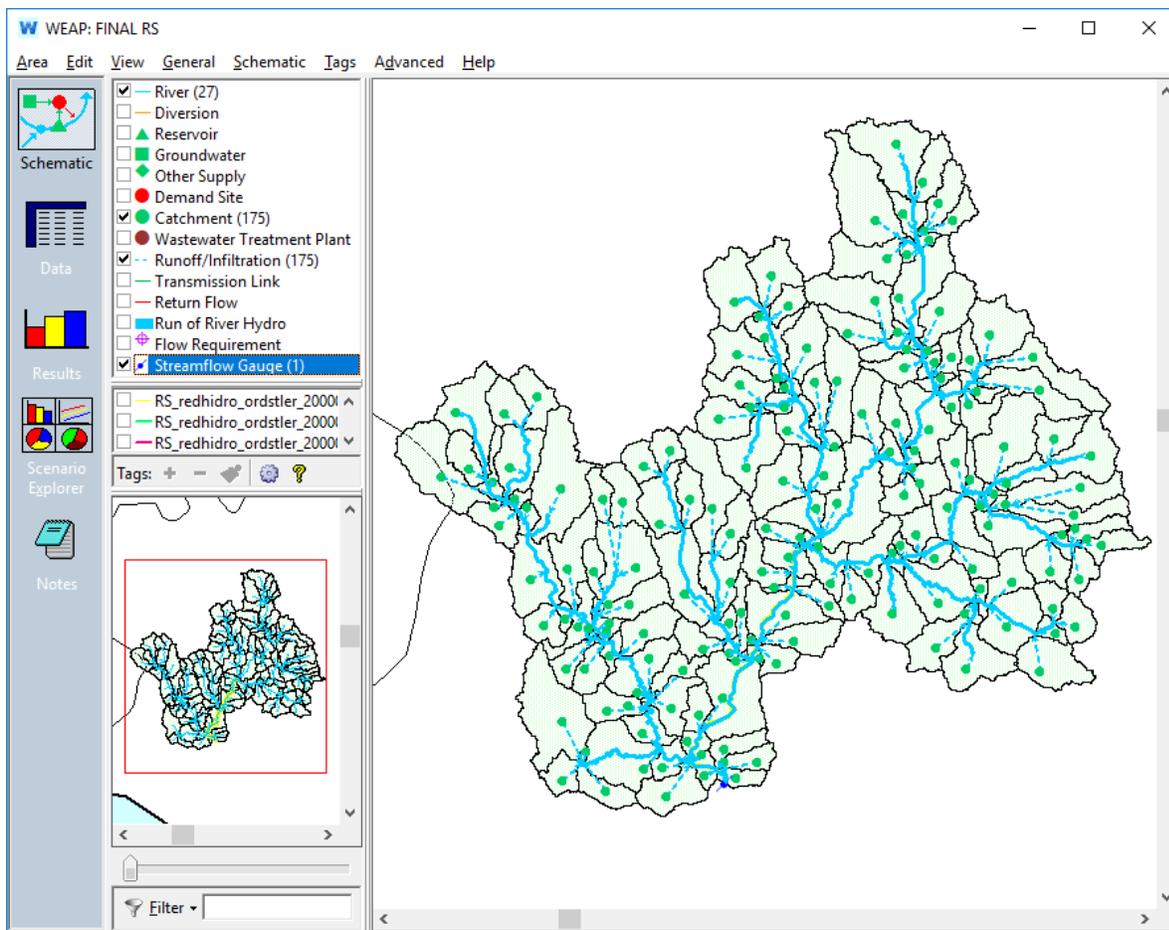


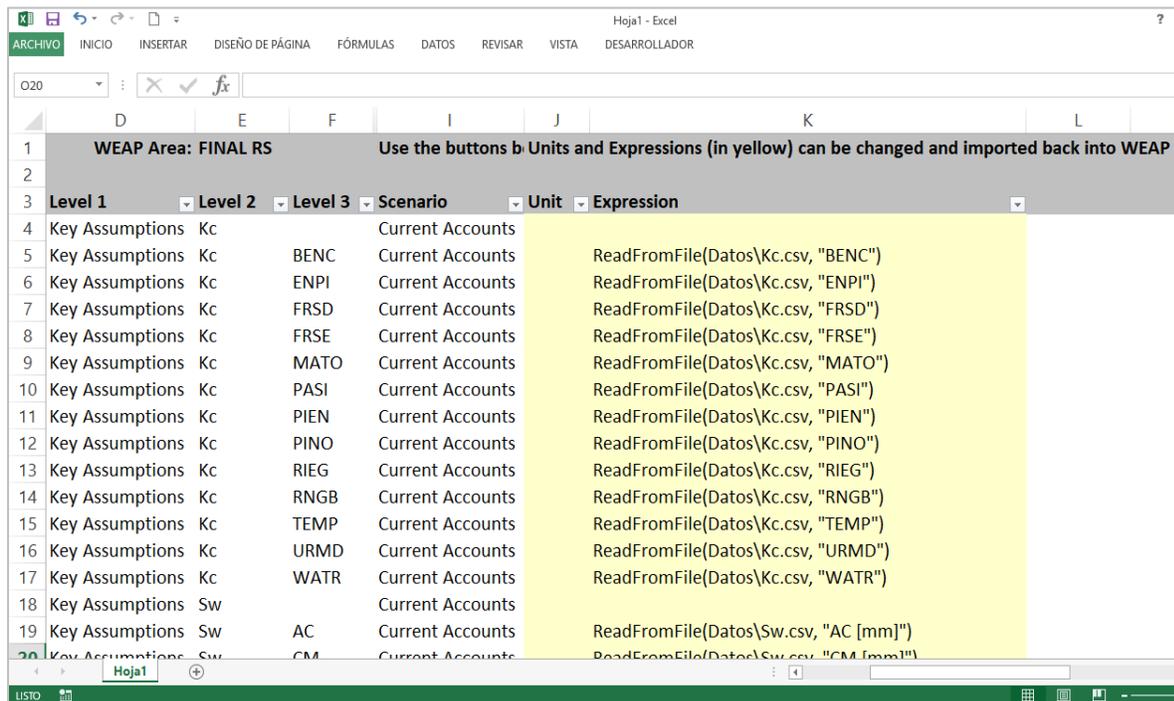
Figura 13. Esquema de la cuenca del río Sordo en la plataforma del modelo WEAP.

Para completar el esquema, en *Data* → *Demand sites and Catchments* se agregaron manualmente las ramificaciones, 1729, es decir las unidades de respuesta hidrológica creadas por SWAT, utilizándose para ello el cuadro generado en la capa vectorial “*FullHRU*”.

5.2.3. Supuestos clave/*Key assumptions*

Los supuestos clave son una herramienta básica de WEAP, se utiliza generalmente cuando se trabaja con muchas subcuencas que requieren ingresar la misma información. En el modelo de la cuenca río Sordo se acudió a esta herramienta para las variables de precipitación, temperatura media, latitud, velocidad del viento, humedad relativa, coeficiente de cultivo, capacidad de almacenamiento de agua en la zona radical, factor de resistencia al escurrimiento (también llamado índice de área foliar), conductividad hidráulica en la zona de raíces y dirección preferencial de flujo.

Los supuestos clave junto con las opciones *Export expressions to Excel* o *Import expressions from Excel*, localizadas en la ventana *Edit*, agilizan el ingreso de datos.



| | D | E | F | I | J | K | L | N |
|----|---------------------|---------|--|------------------|------|---------------------------------------|---|---|
| 1 | WEAP Area: FINAL RS | | Use the buttons b Units and Expressions (in yellow) can be changed and imported back into WEAP | | | | | |
| 2 | | | | | | | | |
| 3 | Level 1 | Level 2 | Level 3 | Scenario | Unit | Expression | | |
| 4 | Key Assumptions | Kc | | Current Accounts | | | | |
| 5 | Key Assumptions | Kc | BENC | Current Accounts | | ReadFromFile(Datos\Kc.csv, "BENC") | | |
| 6 | Key Assumptions | Kc | ENPI | Current Accounts | | ReadFromFile(Datos\Kc.csv, "ENPI") | | |
| 7 | Key Assumptions | Kc | FRSD | Current Accounts | | ReadFromFile(Datos\Kc.csv, "FRSD") | | |
| 8 | Key Assumptions | Kc | FRSE | Current Accounts | | ReadFromFile(Datos\Kc.csv, "FRSE") | | |
| 9 | Key Assumptions | Kc | MATO | Current Accounts | | ReadFromFile(Datos\Kc.csv, "MATO") | | |
| 10 | Key Assumptions | Kc | PASI | Current Accounts | | ReadFromFile(Datos\Kc.csv, "PASI") | | |
| 11 | Key Assumptions | Kc | PIEN | Current Accounts | | ReadFromFile(Datos\Kc.csv, "PIEN") | | |
| 12 | Key Assumptions | Kc | PINO | Current Accounts | | ReadFromFile(Datos\Kc.csv, "PINO") | | |
| 13 | Key Assumptions | Kc | RIEG | Current Accounts | | ReadFromFile(Datos\Kc.csv, "RIEG") | | |
| 14 | Key Assumptions | Kc | RNGB | Current Accounts | | ReadFromFile(Datos\Kc.csv, "RNGB") | | |
| 15 | Key Assumptions | Kc | TEMP | Current Accounts | | ReadFromFile(Datos\Kc.csv, "TEMP") | | |
| 16 | Key Assumptions | Kc | URMD | Current Accounts | | ReadFromFile(Datos\Kc.csv, "URMD") | | |
| 17 | Key Assumptions | Kc | WATR | Current Accounts | | ReadFromFile(Datos\Kc.csv, "WATR") | | |
| 18 | Key Assumptions | Sw | | Current Accounts | | | | |
| 19 | Key Assumptions | Sw | AC | Current Accounts | | ReadFromFile(Datos\Sw.csv, "AC [mm]") | | |
| 20 | Key Assumptions | Sw | CM | Current Accounts | | ReadFromFile(Datos\Sw.csv, "CM [mm]") | | |

Figura 14. Expresiones de supuestos clave exportadas de WEAP a Excel.

5.2.4. Alimentación de datos

Previo a la alimentación del modelo, los datos se recopilaron, procesaron y colocaron en hojas de cálculo (.csv). Proceso descrito en los siguientes apartados.

La información administrada se puede dividir en tres grandes ramas, hidrométrica (hidrometría), climática (precipitación, temperatura media, humedad relativa, velocidad del viento, latitud de las estaciones climatológicas) y de tipo de suelo/uso de suelo y vegetación (superficie del área, índice de área foliar, coeficiente de cultivo, dirección preferencial de flujo, conductividad y capacidad de almacenamiento en las dos capas de suelo). Se adoptó el paso de tiempo mensual para la incorporación de estos datos.

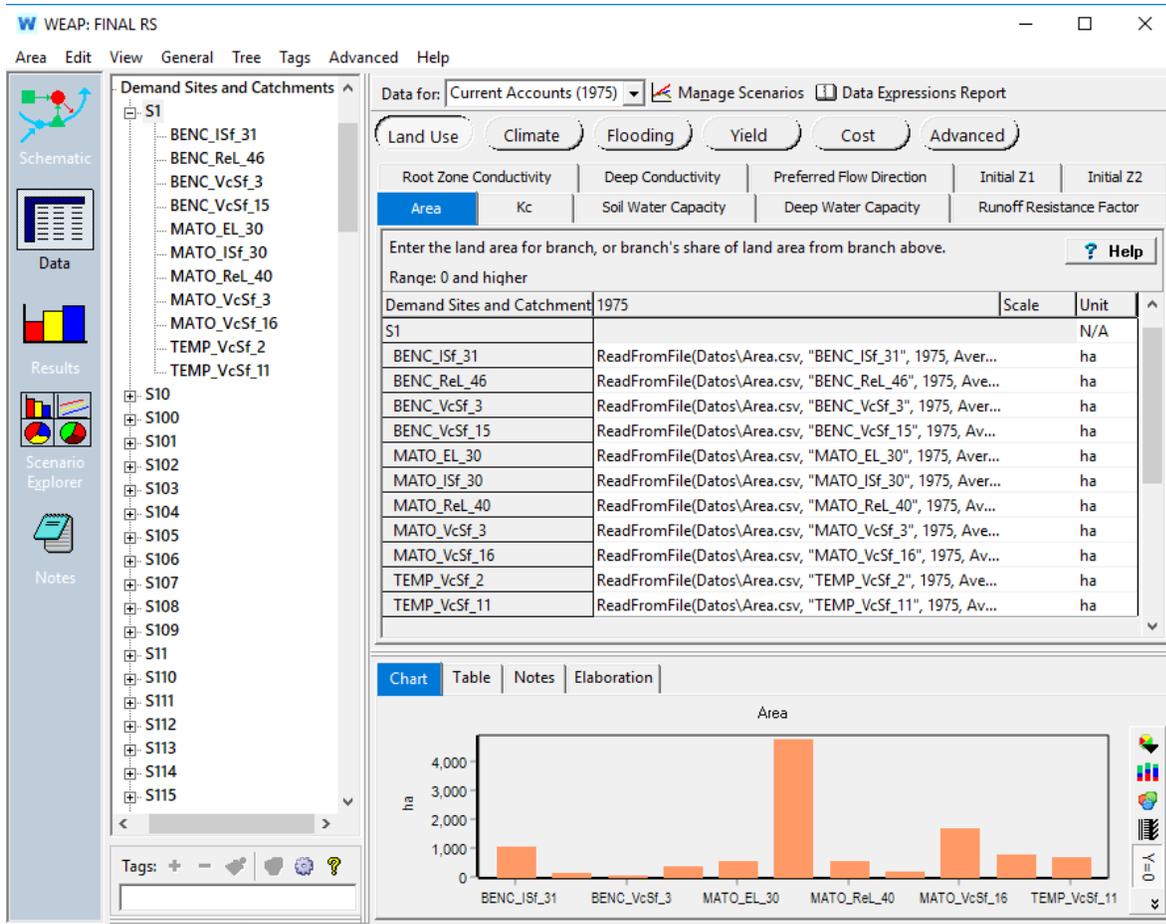


Figura 15. Ventana de ingreso de datos en el modelo WEAP.

5.2.5. Datos climáticos

Generalmente la disponibilidad de datos climáticos e hidrométricos son los que determinan los alcances de un modelo. Esto se debe principalmente a que forman parte de gran cantidad de fórmulas para calcular procesos y a que su gran variabilidad espacial y temporal los vuelve difícil de generar con precisión en caso de que falten.

Para el uso del modelo SWAT se identificaron las estaciones climatológicas presentes en la cuenca, de estas se seleccionaron las que mostraban precipitación y temperatura en el periodo 1975 a 1985, posteriormente se obtuvieron los datos del extractor rápido de información climatológica (ERIC III) y se acomodaron en archivos *.txt (Sánchez-Galindo *et al.*, 2017). Posteriormente en el libro de Access, que recibe el nombre del proyecto creado en el modelo SWAT, se identificó la hoja “wgn”. En ella se buscaron las claves de las estaciones meteorológicas que fueron utilizadas por cada subcuenca (Cuadro 6).

Cuadro 5. Variables climáticas del método de la humedad del suelo-WEAP.

| Variable | Rango | Unidades |
|-----------------------------------|--------------|-------------------|
| Precipitación | ≥ 0 | mm |
| Temperatura media | -50 a 50 | °C |
| Humedad relativa | 0 a 100 | % |
| Viento | ≥ 0 | m s ⁻¹ |
| Nubosidad | 0 a 1 | Fracción |
| Latitud | -90 a 90 | Grados |
| Punto de congelación | -20 a 20 | °C |
| Punto de fusión | -20 a 20 | °C |
| Límite inferior de albedo | 0 a 1 | Fracción |
| Límite superior de albedo | 0 a 1 | Fracción |
| Albedo | 0 a 1 | Fracción |
| Nieve inicial | ≥ 0 | mm |
| Indicador de acumulación de nieve | ≥ 0 | mm |

Cuadro 6. Estaciones meteorológicas utilizadas en la modelación hidrológica.

| Clave | Nombre | Latitud N (°) | Longitud O (°) | Altitud (m) |
|--------------|---------------------------|----------------------|-----------------------|--------------------|
| 20026 | Chalcatongo de Hidalgo | 17.03300 | -97.58300 | 2250 |
| 20038 | Santiago Ixtayutla | 16.56700 | -97.66700 | 510 |
| 20044 | Jalapa del Valle | 17.06700 | -96.88300 | 1650 |
| 20076 | Asuncion Nochixtlán (SMN) | 17.46667 | -97.21667 | 2080 |
| 20094 | Putla de Guerrero (CFE) | 17.11667 | -97.87305 | 1316 |
| 20102 | San Agustín Tlacotepec | 17.20000 | -97.51778 | 2018 |
| 20105 | San Esteban Atlatlahuaca | 17.06500 | -97.67917 | 2455 |
| 20126 | Sta. Cruz Zenzotepec | 16.53300 | -97.48300 | 970 |
| 20130 | Sta. María Yucuhiti | 17.01667 | -97.79972 | 1876 |
| 20153 | Sto. Domingo Teojomulco | 16.60000 | -97.21700 | 1300 |
| 20159 | Pedro y Pablo Teposcol. | 17.50131 | -97.48254 | 2183 |

| Clave | Nombre | Latitud N (°) | Longitud O (°) | Altitud (m) |
|-------|-------------------------------|---------------|----------------|-------------|
| 20167 | Sta. Ma. Asunción Tlax. (DGE) | 17.26700 | -97.68300 | 2065 |
| 20178 | Villa Chalcatongo, (CFE) | 17.03306 | -97.58305 | 2428 |
| 20186 | Santiago Yosondua, Stgo.Y. | 16.89972 | -97.59972 | 2222 |
| 20187 | Yutacua, Stgo. Ixtayutla | 16.60361 | -97.62500 | 437 |
| 20259 | Zacatepec, Zacatepec | 16.75000 | -97.78300 | 900 |

Con tablas dinámicas de Excel los datos diarios de precipitación y temperatura, ingresados en el modelo SWAT, se pasaron a mensuales. Posteriormente las cifras resultantes se colocaron en archivos .csv para ser incorporados a WEAP.

Además de precipitación y temperatura, WEAP requiere otras variables (Cuadro 5). Una de ellas, la latitud, esta se recabó del libro *Access SWAT2012* → *WGEN_user*, se acomodó en formato .csv y se ingresó a WEAP.

Los datos velocidad del viento (VV) y humedad relativa (HR) fueron simulados por SWAT, con los parámetros estadísticos del Cuadro 7. Sin embargo, para contar con esta información en el presente estudio, esta se descargó del *Climate Forecast System Reanalysis*¹ (CFSR, por sus siglas en inglés). A continuación las bases de datos diarios de humedad relativa y viento, se pasaron a datos mensuales en Excel, la humedad relativa se cambió de fracción a porcentaje. En la misma herramienta se crearon arreglos tabulares para cada uno de los años, 1979 a 1985, quedando en la primera columna los códigos de las estaciones, y en las columnas posteriores los datos mensuales correspondientes a HR1, HR2,..., HR12 y VV1, VV2,..., VV12.

Las matrices resultantes se pasaron a archivos .txt. En ArcMap se unió el archivo .shp del CFSR a la matriz de 1979 y se guardó como uno nuevo (CFSR1979), este paso se realizó para cada uno de los años subsecuentes.

Posteriormente utilizando la herramienta *model builder* de ArcMap se creó un modelo con el que se interpoló la HR y la VV para cada uno de los años. Para ello el .shp “CFSR1979” se interpoló mensualmente, usando la extensión *spline*. Enseguida con *extract multivalued to points*, como su

¹ <https://globalweather.tamu.edu/>

nombre lo indica, se extrajeron de los shapefiles resultantes los valores de los puntos en los que se ubican las estaciones meteorológicas del Cuadro 6 (Figura 16).

Los valores obtenidos de la interpolación se acomodaron en Excel para ser ingresados en WEAP y se guardaron en formato .csv. El comportamiento mensual de estas variables para los años 1975 a 1978 es el promedio del periodo 1979 a 1985.

Cuadro 7. Variables climáticas mensuales que requiere el generador climático de SWAT.

| Variable | Valor mínimo | Valor máximo | Unidad | Descripción |
|-----------------|---------------------|---------------------|------------------------------------|---|
| STATION | 0 | 0 | N/A | Nombre de la estación meteorológica. |
| WLATITUDE | -90 | 90 | Grados | Latitud de la estación meteorológica. |
| WELEV | 0 | 5000 | m | Elevación de la estación meteorológica. |
| RAIN_YRS | 5 | 100 | número | Número de años de datos mensuales para precipitaciones en 30 minutos. |
| TMPMX | -30 | 50 | °C | Temperatura máxima promedio del aire para el mes. |
| TMPMN | -40 | 40 | °C | Temperatura mínima promedio del aire para el mes. |
| TMPSTDMX | 0.1 | 100 | °C | Desviación estándar de la temperatura máxima promedio del aire en el mes. |
| TMPSTDMN | 0.1 | 30 | °C | Desviación estándar de la temperatura mínima promedio del aire en el mes. |
| PCPMM | 0 | 600 | mm | Precipitación media que cae en el mes. |
| PCPSTD | 0.1 | 50 | mm | Desviación estándar de la precipitación diaria en el mes. |
| PCPSKW | -50 | 20 | N/A | Coefficiente de sesgo para la precipitación diaria en el mes. |
| PR_W1 | 0 | 0.95 | Fracción | Probabilidad de un día húmedo después de un día seco en el mes. |
| PR_W2 | 0 | 0.95 | Fracción | Probabilidad de un día húmedo después de un día de lluvia en el mes. |
| PCPD | 0 | 31 | días | Número promedio de días de precipitación en el mes. |
| RAINHHMX | 0 | 125 | mm | Precipitación máxima en media hora durante el mes. |
| SOLARAV | 0 | 750 | MJ m ⁻² d ⁻¹ | Radiación solar promedio diaria en el mes. |
| DEWPT | -50 | 25 | °C | Temperatura del punto de rocío promedio en el mes. |
| WNDVAV | 0 | 100 | m s ⁻¹ | Velocidad media del viento en el mes. |

Fuente:(Arnold *et al.*, 2012).

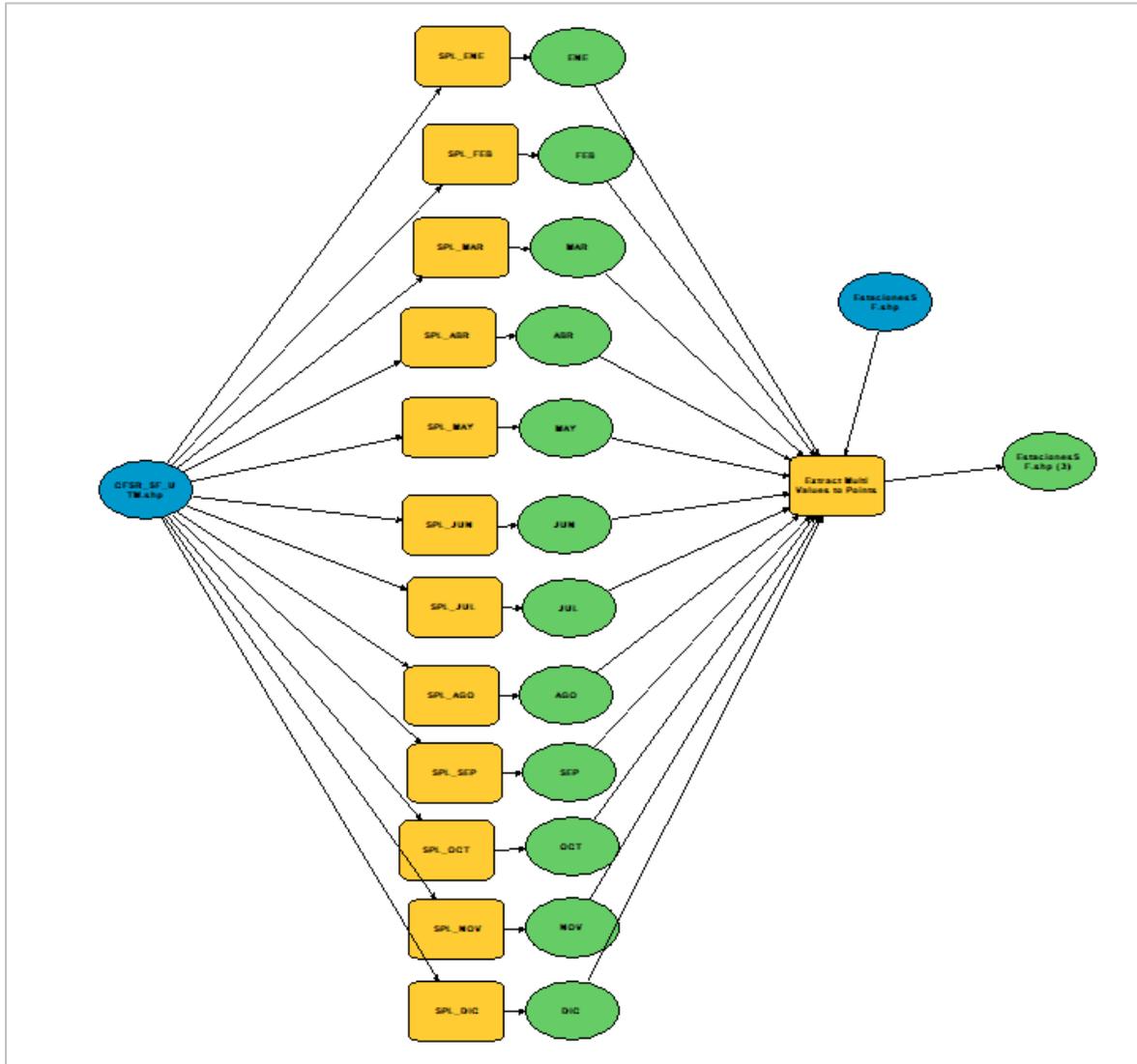


Figura 16. Modelo cartográfico utilizado para interpolar VV y HR de las estaciones del CFSR y asignar el dato resultante a las estaciones meteorológicas de la cuenca.

5.2.6. Datos hidrométricos

En el sitio de estudio se localizan tres estaciones hidrométricas (Cuadro 8). De ellas sólo la estación Ixtayutla se integró al modelo. Esta se localiza en el municipio de Santiago Ixtayutla, Oaxaca, a unos 10 km al oriente de la población con el mismo nombre y 8 km aguas arriba de la unión de los ríos Yolotepec y Verde (Comisión Nacional del Agua, 2008).

Cuadro 8. Estaciones hidrométricas ubicadas en la cuenca del río Sordo.

| Clave | Periodo | Estación | Corriente | X (m) | Y (m) |
|-------|---------------------|-----------|--------------|-----------|------------|
| 20021 | 1961-1985,1987-1991 | Ixtayutla | Yolotepec | 652587.71 | 1831045.26 |
| 20034 | 1954-1967 | Nduave | La Esmeralda | 648902.00 | 1863375.00 |
| 20040 | 1960-1969 | Yutama | Yutama | 645571.58 | 1868072.33 |

El motivo por el que se optó por una sola estación es el número y periodo de datos aforados. En el Cuadro 9 es posible observar los caudales mensuales ingresados en WEAP mediante la ruta *Supply and Resources* → *River* → *Sordo* → *Streamflow Gauges* → *Ixtayutla* → *ReadFromFile Wizard*. La importancia de estos datos radica en el hecho de que son el punto de comparación entre lo que ocurrió en el sistema y lo que simula el modelo.

Cuadro 9. Escurrecimientos mensuales ($m^3 s^{-1}$) en la estación hidrométrica Ixtayutla.

| Mes | 1975 | 1976 | 1977 | 1978 | 1979 | 1980 | 1981 | 1982 | 1983 | 1984 | 1985 |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ene | 34.5 | 33.7 | 32.1 | 38.9 | 37.1 | 36.7 | 32.2 | 48.9 | 25.8 | 37.2 | 43.8 |
| Feb | 28.2 | 27.1 | 26.4 | 26.3 | 32 | 28.4 | 27.9 | ND | 28.7 | 32.1 | 29.8 |
| Mar | 21.8 | 23.3 | 19.6 | 22.7 | 18.9 | 19.4 | 23.3 | ND | 21.9 | 21 | 25.4 |
| Abr | 16.4 | 26.9 | 15.7 | 18.9 | 19.8 | 20.9 | 21.5 | 27.4 | 13 | 13.2 | 22.4 |
| May | 54.9 | 30.8 | 35.5 | 12.1 | 32.8 | 44.7 | 18.4 | 57.5 | 12.2 | 44.1 | 33.5 |
| Jun | 166.3 | 59.6 | 118.2 | 112.4 | 42.5 | 47 | 233.7 | 58.6 | 65.1 | 220.9 | 99.7 |
| Jul | 163.6 | 170.1 | 98.7 | 159.6 | 119 | 111.4 | 308.8 | 97.1 | 148.4 | 354.9 | 181.5 |
| Ago | 209.1 | 114.4 | 148.2 | 160.4 | 188.3 | 269.2 | 338.2 | 77.9 | 128.6 | 289.4 | 243.4 |
| Sep | 389 | 132.1 | 190.6 | 236.6 | 414.8 | 305.7 | 385.6 | 119.4 | 312.2 | 554.5 | 196.1 |
| Oct | 136.9 | 227.1 | 166.7 | 250.6 | 113.8 | 184.2 | 264.5 | 146.3 | 111.5 | 188.5 | 168.6 |
| Nov | 71.7 | 77.6 | 100.3 | 84.4 | 60.9 | 75.4 | 108.5 | 54.1 | 64.3 | 88.5 | 88.2 |
| Dic | 48.2 | 44.8 | 57.9 | 56.2 | 40.9 | 45.1 | 69.1 | 36.2 | 46 | 58.1 | 50.2 |

ND = No datos.

5.2.7. Datos de tipo de suelo/uso de suelo y vegetación

Las diferencias entre las fórmulas matemáticas que integran los programas WEAP y SWAT se manifiestan en la cantidad de información que estos requieren. Por su parte, WEAP posee una menor cantidad de variables que SWAT, contexto que es fácil de deducir al ver los siguientes tres cuadros. El Cuadro 10 contiene los parámetros de uso de suelo y vegetación y tipo de suelo de

WEAP. Por su parte el Cuadro 11 presenta los parámetros de la vegetación y el Cuadro 12 muestra los parámetros necesarios por tipo de suelo, ambos cuadros corresponden a SWAT.

Cuadro 10. Variables de tipo de suelo/uso de suelo y vegetación del método de la humedad del suelo.

| Variable | Rango | Unidad | Descripción |
|-----------------|--------------|-------------------------|---|
| Área | > 0 | km ² o ha | Área de la subcuenca o de los tipos de uso de suelo de esta. |
| Kc | > 0 | N/A | Coefficiente de cultivo. |
| Sw (SWC) | > 0 | mm | Capacidad de almacenamiento de agua en la zona de raíces. |
| Dw (DWC) | > 0 | mm | Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda. |
| RRF (IAF) | 0 - 1000 | N/A | Factor de resistencia al escurrimiento o índice de área foliar. |
| Ks (RZC) | ≥ 0.1 | mm mes ⁻¹ | Conductividad de la zona de raíces. |
| Kd (DC) | ≥ 0.1 | mm mes ⁻¹ | Conductividad de la zona profunda. |
| f (PFD) | 0 - 1 | N/A | Dirección preferencial de flujo. |
| Z1 | 0 - 100 | % | Humedad de la zona de raíces al inicio de la simulación. |
| Z2 | 0 - 100 | % | Humedad de la zona profunda al inicio de la simulación. |

Nota: Las siglas en paréntesis son otra forma de llamar a la variable en la literatura.

Cuadro 11. Descripción de los parámetros fisiotécnicos requeridos por el modelo SWAT.

| Parámetro | Descripción |
|------------------|--|
| CPNM | Código de cuatro caracteres para representar la cobertura del suelo/nombre planta. |
| IDC | Cobertura del suelo / clasificación de las plantas. |
| BIO_E | Conversión de energía en biomasa. |
| HVSTI | Índice de cosecha. |
| BLAI | Índice de área foliar máxima. |
| FRGRW1 | Fracción de la temporada de crecimiento del cultivo que corresponde al primer punto de la curva de desarrollo óptimo del área foliar. |
| LAIMX1 | Fracción del índice de área foliar máximo correspondiente al primer punto de la curva de desarrollo óptimo del área foliar. |
| FRGRW2 | Fracción de la temporada de crecimiento del cultivo que corresponde al segundo punto de la curva de desarrollo óptimo del área foliar. |
| LAIMX2 | Fracción del índice de área foliar máximo correspondiente al segundo punto de la curva de desarrollo óptimo del área foliar. |
| DLAI | Fracción de la temporada de crecimiento cuando el área de la hoja comienza a disminuir. |
| CHTMX | Máxima altura del dosel. |
| RDMX | Máxima profundidad de las raíces. |
| T_OPT | Temperatura óptima para el crecimiento vegetal. |
| T_BASE | Temperatura mínima de crecimiento vegetal. |

| Parámetro | Descripción |
|------------------|---|
| CNYLD | Fracción de nitrógeno en las semillas. |
| CPYLD | Fracción de fósforo en las semillas. |
| BN1 | Fracción de N en las plantas durante la emergencia. |
| BN2 | Fracción de N en la planta de 0.5 madurez. |
| BN3 | Fracción de N en la planta en la madurez. |
| BP1 | Fracción de P durante la emergencia. |
| BP2 | Fracción de P en la planta de 0.5 madurez. |
| BP3 | Fracción de P en la madurez. |
| WSYF | Límite inferior del índice de cosecha. |
| USLE_C | Valor mínimo de la USLE factor C aplicable a la cobertura del suelo / planta. |
| GSI | Conductancia estomática máxima (en condiciones sequía). |
| VPDFR | Déficit de presión de vapor correspondiente a la fracción de conductancia estomática máxima definida por FRGMAX |
| FRGMAX | Fracción de la conductancia estomática máxima que se puede lograr con un déficit elevado de presión de vapor. |
| WAVP | Tasa de disminución de la eficiencia del uso de la radiación por unidad de aumento del déficit de presión de vapor. |
| CO2HI | Elevada concentración atmosférica de CO ₂ . |
| BIOEHI | Relación de biomasa-energía correspondiente al segundo punto en la curva de eficiencia de uso de radiación. |
| RSDCO_PL | Coefficiente de descomposición de residuos vegetales. |
| Cropname | Nombre de la descripción de la cosecha. |
| CN2 | Número de curva, condición de humedad II, para el cálculo del escurrimiento del SCS. |
| OV_N | Valor "n" de Manning para el flujo superficial. |
| FERTFIELD | Si está marcado, el cultivo va a ser fertilizado. |
| ALAI_MIN | Índice de área foliar mínima para la planta durante el período de dormancia. |
| BIO_LEAF | Fracción de la biomasa del árbol convertida en residuo durante la dormancia. |
| MAT_YRS | Número de años requeridos para que las especies de árboles alcancen su pleno desarrollo. |
| BMX_TREES | Biomasa máxima para un bosque. |
| EXT_COEF | Coefficiente de extinción de la luz. |
| CN2A | Número de curva, condición de humedad II, para el cálculo del escurrimiento del SCS. |
| CN2B | Número de curva, condición de humedad II, para el cálculo del escurrimiento del SCS. |
| CN2C | Número de curva, condición de humedad II, para el cálculo del escurrimiento del SCS. |
| CN2D | Número de curva, condición de humedad II, para el cálculo del escurrimiento del SCS. |
| BM_DIEOFF | Fracción de biomasa muerta. |

Fuente: Arnold *et al.* (2012).

Cuadro 12. Variables de suelo del modelo SWAT.

| Variable | Valor mínimo | Valor máximo | Unidad | Descripción |
|------------|--------------|--------------|---------------------|--|
| SNAM | 0 | 0 | N/A | Nombre del suelo |
| NLAYERS | 1 | 10 | N/A | Número de capas en el perfil |
| HYDGRP | 0 | 0 | N/A | Grupo hidrológico |
| SOL_ZMX | 0 | 3500 | mm | Máxima profundidad de raíces |
| ANION_EXCL | 0.01 | 1 | Fracción | Porosidad |
| SOL_CRK | 0 | 1 | Fracción | Potencial de volumen de grietas del suelo. |
| TEXTURE | 0 | 0 | Fracción | Textura |
| SOL_Z | 0 | 3500 | mm | Profundidad |
| SOL_BD | 0.9 | 2.5 | g cm ⁻³ | Densidad aparente |
| SOL_AWC | 0 | 1 | mm mm ⁻¹ | Capacidad de agua disponible |
| SOL_K | 0 | 2000 | mm h ⁻¹ | Conductividad hidráulica |
| SOL_CBN | 0.05 | 10 | % | Contenido de carbono orgánico |
| CLAY | 0 | 100 | % | Contenido de arcilla |
| SILT | 0 | 100 | % | Contenido de limo |
| SAND | 0 | 100 | % | Contenido de arena |
| ROCK | 0 | 100 | % | Contenido de rocas |
| SOL_ALB | 0 | 0.25 | N/A | Albedo |
| USLE_K | 0 | 0.65 | N/A | Factor USLE |
| SOL_EC | 0 | 100 | dS m ⁻¹ | Conductividad eléctrica |
| SOL_CAL | 0 | 65 | % | Contenido de carbonato de calcio. |
| SOL_PH | 3 | 10 | N/A | pH |

Fuente:(Arnold *et al.*, 2012).

Área

La superficie de cada tipo de cobertura ingresada en WEAP, para las 1729 URH, se obtuvo de la hoja *FullHRU* del libro en Access que recibe el nombre del proyecto creado con SWAT. Esta área (ha) se colocó en una hoja de Excel *.csv y se ingresó a WEAP.

Coefficiente de cultivo

La metodología del coeficiente del cultivo usada para el cálculo de la evapotranspiración fue la de cultivo bajo condiciones estándar (ET_c). Las condiciones estándar de los cultivos son: que se desarrollen en campos extensos, bajo condiciones agronómicas excelentes y sin limitaciones de humedad en el suelo. La evapotranspiración de un cultivo será diferente a la del cultivo de referencia ET_o en la medida que sus características de cobertura del suelo, propiedades de la

vegetación y resistencia aerodinámica difieran a las correspondientes al pasto. Los efectos de las características que distinguen al cultivo del pasto están incorporadas en el coeficiente del cultivo K_c . En la metodología del coeficiente del cultivo, la evapotranspiración del cultivo se calcula multiplicando ET_o por K_c (Allen, Pereira, Raes, & Smith, 2006).

$$ET_c = K_c ET_o \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

ET_c : Evapotranspiración del cultivo (mm d^{-1})

K_c : Coeficiente del cultivo (adimensional)

ET_o : Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm d^{-1})

El coeficiente de cultivo, en WEAP, se utiliza con la ecuación de Penman-Monteith para calcular la evapotranspiración de la unidad de captación (ver el segundo término de la Ecuación 1) y varía espacialmente de acuerdo a los diferentes tipos de cobertura y temporalmente con la etapa de desarrollo de los cultivos.

Cuadro 13. Valores de K_c utilizados en la cuenca del río Sordo.

| Clave | Descripción | Coeficiente de cultivo (K_c) |
|-------|------------------------------|----------------------------------|
| BENC | Bosque de encino | 0.87 |
| ENPI | Bosque de encino-pino | 0.80 |
| FRSD | Selva baja caducifolia | 0.99 |
| FRSE | Bosque mesófilo de montaña | 1.08 |
| MATO | Chaparral | 0.56 |
| PASI | Pastizal | 0.97 |
| PIEN | Bosque de pino-encino | 0.99 |
| PINO | Bosque de pino | 1.03 |
| RIEG | Agricultura de riego | 1.11 |
| RNGB | Bosque de táscate | 0.79 |
| TEMP | Agricultura de temporal | 0.89 |
| URMD | Residencial mediana densidad | 1.00 |
| WATR | Cuerpos de agua | 0.70 |

Capacidad de almacenamiento de agua de la zona de raíces

Es la capacidad de retención de agua del suelo en la capa superior o zona de raíces (mm). Por esta razón se plantearon profundidades para cada uso de suelo y vegetación (Cuadro 14). Con estas profundidades se calculó, para cada tipo de suelo, el alcance de la zona radical (Ecuación 10) y los resultados se redondearon a múltiplos de 50 (Cuadro 15). Finalmente se computó S_w con la Ecuación 11. Cabe mencionar que SWAT divide el suelo en varias capas por lo que se sumaron las que por su profundidad quedan dentro de la primera capa de WEAP.

Cuadro 14. Profundidad de raíces propuesta para cada uso de suelo y vegetación.

| Clave | Descripción | Profundidad (mm) |
|--------------|------------------------------|-------------------------|
| BENC | Bosque de encino | 600 |
| ENPI | Bosque de encino-pino | 600 |
| FRSD | Selva baja caducifolia | 500 |
| FRSE | Bosque mesófilo de montaña | 1000 |
| MATO | Chaparral | 400 |
| PASI | Pastizal | 200 |
| PIEN | Bosque de pino-encino | 600 |
| PINO | Bosque de pino | 800 |
| RIEG | Agricultura de riego | 600 |
| RNGB | Bosque de táscate | 500 |
| TEMP | Agricultura de temporal | 350 |
| URMD | Residencial mediana densidad | 650 |
| WATR | Cuerpos de agua | 0 |

$$Pr_p = \sum_{i=1}^n \frac{A_i USV_i}{AT_s} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

Pr_p : Profundidad radicular ponderada (mm)

A_i : Área del uso de suelo y vegetación (ha)

USV_i : Profundidad del uso de suelo y vegetación (mm)

AT_s : Área total del tipo de suelo de interés (ha)

Cuadro 15. Profundidades de la primera capa de suelo de la cuenca del río Sordo.

| Clave | Suelo | Profundidad primer capa WEAP (mm) | Profundidad total (mm) |
|-------|----------|-----------------------------------|------------------------|
| AC | Acrisol | 650 | 1100 |
| CM | Cambisol | 600 | 1250 |
| EL | Rendzina | 500 | 650 |
| FL | Fluvisol | 500 | 1000 |
| Hc | Phaeozem | 450 | 1000 |
| Is | Litosol | 500 | 650 |
| Lc | Luvisol | 550 | 1000 |
| Re | Regosol | 500 | 800 |
| Vc | Vertisol | 350 | 1000 |

$$S_w = \sum_{i=1}^n SOL_Z_i SOL_AWC_i \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde:

S_w : Capacidad de almacenamiento de agua de la zona de raíces (mm)

SOL_Z : Profundidad de la capa (mm)

SOL_AWC : Capacidad de agua disponible de la capa (mm mm⁻¹)

Cuadro 16. Valores de la capacidad de almacenamiento de agua de la zona radical (S_w).

| Clave | Suelo | S_w (mm) |
|-------|----------|------------|
| AC | Acrisol | 340 |
| CM | Cambisol | 274 |
| EL | Rendzina | 291 |
| FL | Fluvisol | 199 |
| Hc | Phaeozem | 205 |
| Is | Litosol | 222 |
| Lc | Luvisol | 296 |
| Re | Regosol | 212 |
| Vc | Vertisol | 178 |

Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda

Es la capacidad de retención de agua del suelo en la capa profunda (mm). El grosor de la zona profunda de cada tipo de suelo es la diferencia entre los valores de, profundidad total y de la primera capa (Cuadro 15). Así, con la Ecuación 12 se obtuvo un valor de Dw por tipo de suelo (Dw_s) (Cuadro 17), sin embargo este parámetro en WEAP es único por subcuenca y se calculó con la Ecuación 13. El rango de Dw_{sub} osciló entre 83 y 294 mm.

$$Dw_s = \sum_{i=1}^n SOL_Z_i \cdot SOL_AWC_i \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

Dw_s : Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda del tipo de suelo (mm)

SOL_Z_i : Profundidad de la capa (mm)

SOL_AWC_i : Capacidad de agua disponible de la capa (mm mm^{-1})

Cuadro 17. Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda por tipo de suelo (Dw_s).

| Clave | Suelo | Dw_s (mm) |
|-------|----------|-------------|
| AC | Acrisol | 340 |
| CM | Cambisol | 274 |
| EL | Rendzina | 291 |
| FL | Fluvisol | 199 |
| Hc | Phaeozem | 205 |
| Is | Litosol | 222 |
| Lc | Luvisol | 296 |
| Re | Regosol | 212 |
| Vc | Vertisol | 178 |

$$Dw_{sub} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i \cdot Dw_{s_i}}{AT_{sub}} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde:

DW_{sub} : Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda de la subcuenca (mm)

A_i : Área del tipo de suelo (ha)

DW_{s_i} : Capacidad de almacenamiento de agua en la zona profunda del tipo de suelo (mm)

AT_{sub} : Área total de la subcuenca (ha)

Factor de resistencia al escurrimiento o índice de área foliar

Este parámetro se localiza en el tercer término de la Ecuación 1, el cual representa el escurrimiento superficial. El nombre varía de acuerdo al autor, así Ingol-Blanco & McKinney (2013) y Yates *et al.* (2005) lo nombran como LAI (siglas en inglés para Índice de Área Foliar) mientras que Angarita *et al.* (2018) y Sieber & Purkey (2015) lo llaman RRF, factor de resistencia al escurrimiento. Valores bajos de esta variable generan escurrimientos superficiales altos, como los suelos desnudos, es decir, el escurrimiento tiende a disminuir conforme aumentan los valores de IAF.

El índice de área foliar, es una cantidad adimensional, que representa el área de la hoja (lado superior solamente) por unidad de área de suelo subyacente. Se expresa en m^2 de área foliar por unidad (m^2) de área de suelo. Los valores de IAF para los diferentes cultivos difieren grandemente pero valores de 3 a 5 son comunes para muchos cultivos desarrollados. Para un cultivo dado, el IAF cambia a lo largo del periodo de crecimiento y alcanza normalmente su máximo valor antes o en la floración. El IAF también depende de la densidad de las plantas y de la variedad del cultivo (Allen *et al.*, 2006).

El proyecto para el modelo SWAT en la cuenca del río Sordo cuenta con la variable índice de área foliar máxima ($m^2 m^{-2}$), cuya clave es BLAI. Esta variable es afín a RRF del modelo WEAP.

Cuadro 18. Índices de área foliar por tipo de cobertura ingresados a WEAP.

| Clave | Descripción | IAF o RRF (m ² m ⁻²) |
|-------|------------------------------|---|
| BENC | Bosque de encino | 5.7 |
| ENPI | Bosque de encino-pino | 5.7 |
| FRSD | Selva baja caducifolia | 2.1 |
| FRSE | Bosque mesófilo de montaña | 5.6 |
| MATO | Chaparral | 2.1 |
| PASI | Pastizal | 1.7 |
| PIEN | Bosque de pino-encino | 5.5 |
| PINO | Bosque de pino | 5.5 |
| RIEG | Agricultura de riego | 3.6 |
| RNGB | Bosque de táscate | 5.6 |
| TEMP | Agricultura de temporal | 3.6 |
| URMD | Residencial mediana densidad | 8 |
| WATR | Cuerpos de agua | 0.1 |

Conductividad hidráulica de la zona radical

Es la tasa de conductividad hidráulica a saturación que se presenta en la capa superficial del suelo cuando el almacenamiento relativo de $Z1 = 1.0$, el cual se divide de acuerdo a la dirección preferencial de flujo, en flujo subsuperficial y percolación hacia la capa profunda.

El valor automático de K_s que ingresa WEAP es 20 mm mes^{-1} no obstante en WEAP se incorporaron los valores del Cuadro 19, calculados con la Ecuación 14.

Cuadro 19. Valores de conductividad hidráulica en la zona radical.

| Clave | Suelo | K_s (mm mes ⁻¹) |
|-------|----------|-------------------------------|
| AC | Acrisol | 32 |
| CM | Cambisol | 569 |
| EL | Rendzina | 796 |
| FL | Fluvisol | 1064 |
| Hc | Phaeozem | 278 |
| Is | Litosol | 335 |
| Lc | Luvisol | 483 |
| Re | Regosol | 540 |
| Vc | Vertisol | 121 |

$$K_s = \sum_{i=1}^n \frac{SOL_{Z_i} K24_i}{Pr_p} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

K_s : Conductividad hidráulica de la zona radical (mm mes⁻¹)

SOL_{Z_i} : Profundidad de la capa (mm)

$K24_i$: Parámetro de SWAT SOL_K de la capa multiplicado por 24

Pr_p : Profundidad radicular por tipo de suelo ponderada (mm)

Conductividad hidráulica de la zona profunda

Es la tasa de conductividad hidráulica a saturación de la capa inferior del suelo, cuando el almacenamiento relativo de $Z2 = 1.0$, el cual controla la transmisión del flujo base. Esto es dado como un valor único para el sitio de captación. El flujo base se incrementa a medida que este parámetro aumenta.

Con la Ecuación 15 se obtuvo un valor de Kd por tipo de suelo (Kd_s) (

Cuadro 20), sin embargo este parámetro se ingresó a nivel subcuena por lo que se calculó con la Ecuación 16, obteniéndose un rango entre 10 y 1241 mm mes⁻¹.

$$Kd_s = \sum_{i=1}^n \frac{SOL_{Z_i} K24_i}{Pr_2} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

Kd_s : Conductividad hidráulica de la zona profunda del tipo de suelo (mm mes⁻¹)

SOL_{Z_i} : Profundidad de la capa (mm)

$K24_i$: Parámetro de SWAT SOL_K de la capa multiplicado por 24

Pr_2 : Profundidad de la capa profunda por tipo de suelo (mm)

Cuadro 20. Conductividad hidráulica de la zona profunda por tipo de suelo (Kd_s).

| Clave | Suelo | Kd_s (mm mes ⁻¹) |
|-------|----------|--------------------------------|
| AC | Acrisol | 28 |
| CM | Cambisol | 318 |
| EL | Rendzina | 10 |
| FL | Fluvisol | 1331 |
| Hc | Phaeozem | 94 |
| Is | Litosol | 10 |
| Lc | Luvisol | 212 |
| Re | Regosol | 10 |
| Vc | Vertisol | 123 |

$$Kd_{sub} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i Kd_{s_i}}{AT_{sub}} \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

Kd_{sub} : Conductividad hidráulica de la zona profunda de la subcuenca (mm mes⁻¹)

A_i : Área del tipo de suelo (ha)

Kd_{s_i} : Conductividad de la zona profunda del tipo de suelo (mm mes⁻¹)

AT_{sub} : Área total de la subcuenca (ha)

Humedad inicial de la zona radicular

La humedad de la zona radicular (Z1) al inicio de la simulación es el almacenamiento relativo de la primera capa expresado como porcentaje de la acumulación efectiva total. Este parámetro varía de acuerdo al tipo de suelo de 0 a 100% y se tomó como valor inicial $Z1 = 30\%$.

Humedad inicial de la zona profunda

La humedad inicial de la zona profunda (Z2) es el almacenamiento de agua relativo de la segunda capa de suelo expresado como un porcentaje del almacenamiento efectivo en la zona profunda y

oscila entre 0 y 100%. Este parámetro varía por subcuenca, pero en el presente trabajo se tomó el valor inicial $Z_2 = 30\%$ para todas estas.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Sánchez-Galindo *et al.* (2017) utilizaron el periodo de 1975 a 1985 para la calibración y validación de los escurrimientos en el modelo SWAT, siendo el primer año para entrenamiento y los siguientes cinco (1976 a 1981) para calibración y los últimos cuatro (1982 a 1985) para validación. Para la modelación en WEAP se empleó el mismo periodo, tomándose el año 1975 como base, y los restantes, 1976 a 1985, como un único periodo para evaluar la eficiencia.

6.1. Caudales medios mensuales

En la Figura 17 se muestran los caudales mensuales medidos *versus* los simulados por SWAT y WEAP. También se incluyen los valores de NSE y PBIAS. Se observa que WEAP computa bien los caudales base mientras que SWAT replica mejor los caudales pico. Este comportamiento de WEAP difiere de los resultados obtenidos por Ingol-Blanco & McKinney (2013) quienes encontraron que WEAP reproduce mejor los escurrimientos pico que los caudales base, en la cuenca del río Conchos. Así mismo se nota que el valor de $NSE = 0.82$ de SWAT, es mayor que el $NSE = 0.73$ de WEAP.

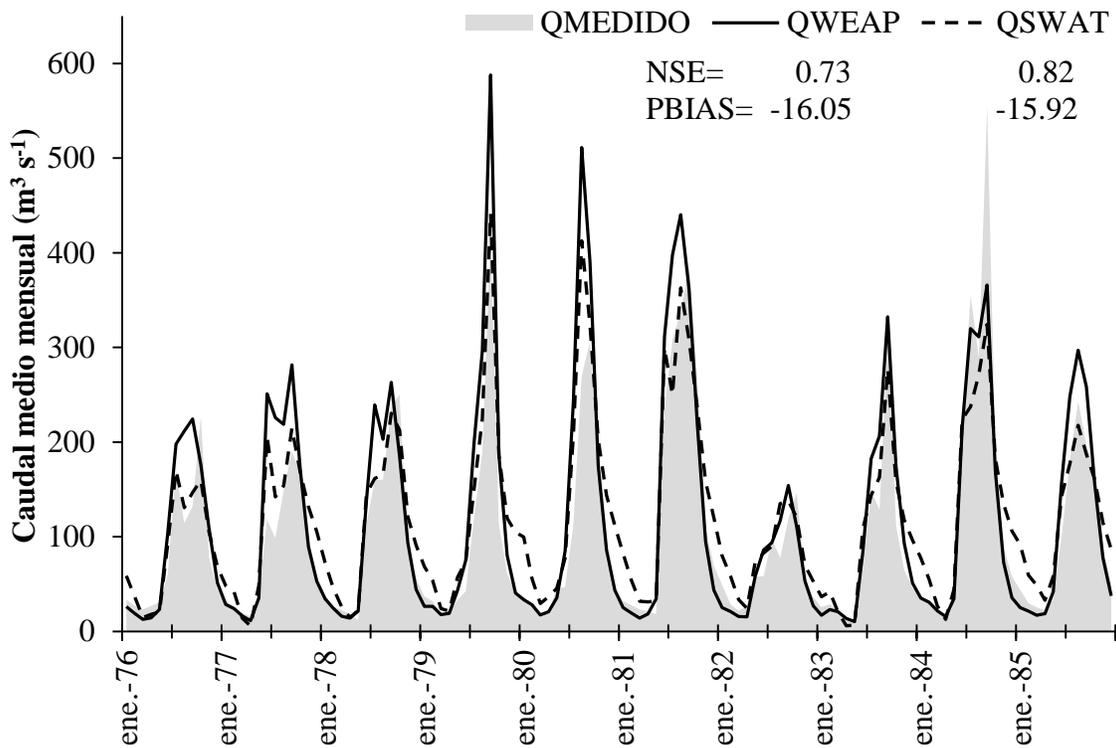


Figura 17. Caudales medios mensuales observados y simulados por SWAT y WEAP de la cuenca del río Sordo.

Los valores de NSE de acuerdo con Moriasi *et al.* (2007) son “muy bueno” para SWAT y “bueno” para WEAP. Por otro lado los valores de PBIAS, -16.05 y -15.92 de WEAP y SWAT, respectivamente, indican que ambas herramientas sobreestiman de manera muy similar el caudal mensual observado.

El índice $NSE = 0.73$ de WEAP, se encuentran dentro del rango de resultados que han tenido otros autores como Varela-Ortega *et al.* (2016) en la cuenca del río Guadiana, España, con $NSE > 0.7$; Olsson *et al.* (2017) en la cuenca Chancay-Huaral Perú, con $NSE \geq 0.8$; y Höllermann *et al.* (2010) en la cuenca Ouémé-Bonou, Benín, con $NSE \geq 0.78$.

En la Figura 18 se observa el r^2 del escurrimiento medio mensual. El r^2 de SWAT es ligeramente más alto que el de WEAP (0.85 vs. 0.84), es decir revela un menor error de variación. Sin embargo aunque la r^2 se ha utilizado ampliamente para la evaluación de modelos, sólo cuantifica la dispersión. Por ejemplo, un modelo que sistemáticamente sobreestima o subestima todo el tiempo mostrará valores cercanos a 1.0, incluso si todas las predicciones fueran erróneas (Krause *et al.*,

2005; Moriasi *et al.*, 2007). Para complementar el valor de r^2 es esencial señalar que en la ordenada al origen WEAP presenta un valor más cercano a cero (6.6) que SWAT (34.9), es decir, un caudal observado de cero daría como resultado 6.6 en WEAP y 34.9 en SWAT. Al mismo tiempo la pendiente de la recta refleja una predicción insuficiente de 9.6% para WEAP y de 15.3% para SWAT.

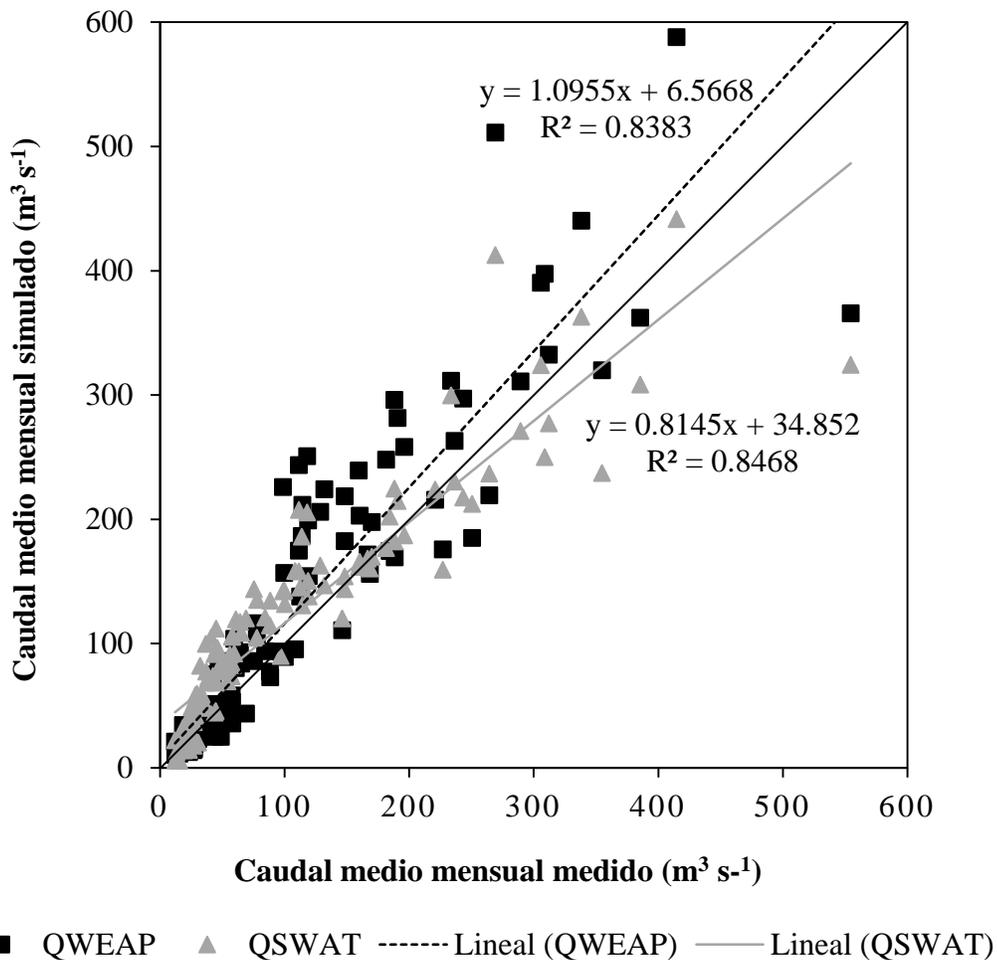


Figura 18. Relación entre caudales medios mensuales observados y simulados con SWAT y WEAP en la cuenca del río Sordo.

Los modelos SWAT y WEAP se han utilizado conjuntamente en cuencas de Etiopía y Lesoto. El primero, para conocer el sistema y su comportamiento hidrológico mientras que el segundo, utilizando resultados de SWAT, para cuantificar la distribución de los recursos hídricos de la cuenca bajo diversos criterios (Adgolign *et al.*, 2016; Hussen *et al.*, 2018; Maliehe & Mulungu,

2017). Por su parte Faiz *et al.* (2018) evaluó la capacidad de reproducir los escurrimientos diarios y mensuales de la cuenca del río Songhua de cinco modelos hidrológicos; resultando WEAP el mejor evaluado, superando a los otros 4 modelos, entre los otros modelos se encuentra SWAT, quien quedó en tercer lugar.

6.2. Caudales medios anuales

Los caudales medios anuales simulados en WEAP no se asemejaron a los observados en la estación hidrométrica, sobre todo en los años 1977, 1979 y 1980 (Figura 19). Por esta razón se obtuvo un $NSE = 0.3$, en otras palabras, un ajuste “insatisfactorio” según Moriasi *et al.* (2007). Por su parte SWAT mostró un mejor ajuste con un $NSE = 0.73$ “bueno” y un $PBIAS = -4.6$, es decir sólo sobreestimó en un 4.6 %. Algo semejante ocurre con los valores de r^2 , WEAP obtuvo 0.63 mientras que SWAT logró 0.76 (Figura 20).

En síntesis SWAT presentó mejores índices de eficiencia que WEAP para el cálculo del escurrimiento mensual y anual en la cuenca del río Sordo durante el periodo 1976 a 1985.

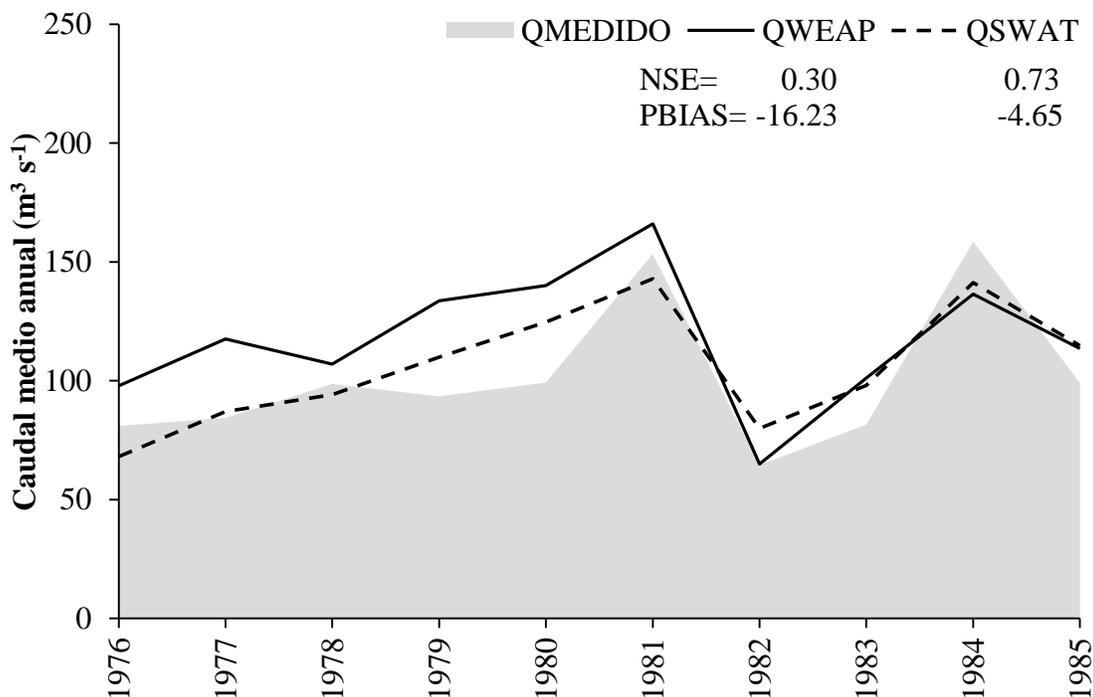


Figura 19. Caudales medios anuales observados y simulados por SWAT y WEAP de la cuenca del río Sordo.

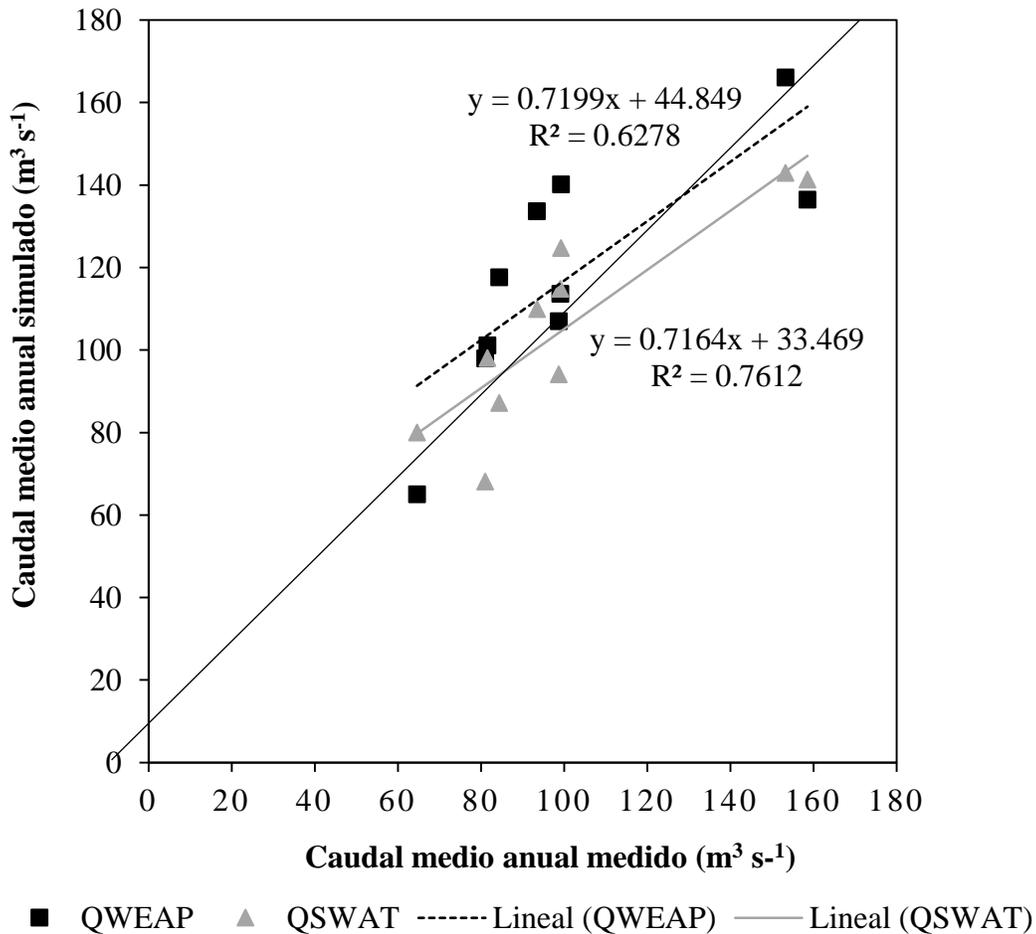


Figura 20. Relación entre caudales medios anuales observados y simulados por SWAT y WEAP de la cuenca del río Sordo.

6.3. Resumen de resultados

En el Cuadro 21 es posible apreciar que SWAT y WEAP son confiables para la simulación de escurrimientos, aseveración también concebida por Faiz *et al.* (2018) quien obtuvo valores de NSE entre 0.83 y 0.88, r^2 entre 0.86 y 0.92, para WEAP, y NSE entre 0.80 y 0.81, r^2 entre 0.81 y 0.82, para SWAT. Así mismo SWAT ha demostrado en el trabajo de Sánchez-Galindo *et al.* (2017) que simula satisfactoriamente la producción de biomasa y sedimentos. Por ende la elección de uno u otro modelo dependerá de los datos disponibles, los objetivos del estudio, de la herramienta que conozca el modelador y los intereses de los tomadores de decisiones.

Cuadro 21. Evaluación de la eficiencia para simular escurrimientos mensuales y anuales de WEAP y SWAT.

| Periodo | Modelo | r² | NSE | Ajuste NSE | PBIAS (%) | Ajuste PBIAS |
|----------------|---------------|----------------------|------------|-------------------|------------------|---------------------|
| Mensual | SWAT | 0.85 | 0.82 | Muy bueno | -15.92 | Satisfactorio |
| | WEAP | 0.84 | 0.73 | Bueno | -16.05 | Satisfactorio |
| Anual | SWAT | 0.76 | 0.73 | Bueno | -4.65 | Muy bueno |
| | WEAP | 0.63 | 0.3 | Insatisfactorio | -16.23 | Satisfactorio |

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1. Conclusiones

La modelación hidrológica es una herramienta útil para el conocer el comportamiento y distribución del recurso hídrico en una cuenca. El conocimiento que se obtiene de este proceso es crucial en la implementación de políticas de gestión sustentable para su uso y aprovechamiento.

Los resultados obtenidos en el presente estudio manifiestan que los modelos SWAT y WEAP son capaces de simular satisfactoriamente los escurrimientos mensuales y anuales de la cuenca del río Sordo, según los índices de eficiencia r^2 , NSE y PBIAS. Sin embargo en el paso de tiempo anual WEAP presenta un NSE = 0.3, por lo cual SWAT fue superior.

La cantidad de datos para el funcionamiento de estas dos herramientas es desigual. Por un lado SWAT, modelo de base física, requiere una enorme cantidad de información mientras que WEAP, modelo conceptual-base física, demanda una menor cantidad de datos. Sin embargo esta característica a favor de WEAP presenta el inconveniente que los valores de esos pocos parámetros, que lo definen, no están plenamente acotados en la literatura como sucede con SWAT.

Es importante enfatizar que antes de elegir el mejor modelo se deben tener claros los objetivos del estudio, y la disponibilidad, capacidades y necesidades de la herramienta computacional a utilizar.

7.2. Recomendaciones

Se recomienda cambiar los datos de VV (velocidad del viento) y HR (humedad relativa) que alimentaron el modelo WEAP en este estudio por valores observados en las estaciones automáticas de la cuenca. Así mismo, modificar los valores de Kc (coeficiente de cultivo), IAF (índice de área foliar) y f (dirección preferencial de flujo) por valores encontrados en la literatura para observar el comportamiento del modelo WEAP sin la influencia de SWAT como ocurrió en esta investigación.

Los resultados indican que WEAP simula satisfactoriamente los escurrimientos mensuales de la cuenca. Por lo que este trabajo puede ser la base para futuros estudios de planificación y gestión del recurso agua bajo escenarios de cambios de demanda de agua, crecimiento poblacional, cambio de uso de suelo, cambio climático, presencia de contaminantes, entre otros, en la cuenca del río Sordo.

Se exhorta a utilizar WEAP en cuencas donde se desee conocer el comportamiento del sistema hídrico pero la cantidad de datos disponibles no sean suficientes para cumplir con los requerimientos de información del modelo SWAT.

Para futuras comparaciones entre los modelos manejados en esta investigación se recomienda consultar a Faiz *et al.* (2018), ya que estos autores alimentaron WEAP y SWAT, entre otros, de manera independiente y obtuvieron eficiencias mejores para el modelo WEAP, es decir valores contrarios a los obtenidos en el presente trabajo.

8. LITERATURA CITADA

- Adgolign, T. B., Srinivasa Rao, G. V. R., & Abbulu, Y. (2016). WEAP modeling of surface water resources allocation in Didessa Sub-Basin, West Ethiopia. *Sustainable Water Resources Management*, 2(1), 55–70. <https://doi.org/10.1007/s40899-015-0041-4>
- Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). *Estudio FAO riego y drenaje 56. Evapotranspiración del cultivo (guías para la determinación de riego de los requerimientos de agua de los cultivos)*. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Recuperado de <http://www.fao.org/3/a-x0490s.pdf>
- Amin, A., Iqbal, J., Asghar, A., & Ribbe, L. (2018). Analysis of current and future water demands in the Upper Indus Basin under IPCC climate and socio-economic scenarios using a hydro-economic WEAP Model. *Water (Switzerland)*, 10(5), 537. <https://doi.org/10.3390/w10050537>
- Angarita, H., Wickel, A. J., Sieber, J., Chavarro, J., Maldonado-Ocampo, J. A., Herrera-R., G. A., ... Purkey, D. (2018). Basin-scale impacts of hydropower development on the Mompós Depression wetlands, Colombia. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(5), 2839–2865. <https://doi.org/10.5194/hess-22-2839-2018>
- Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B., & Neitsch, S. L. (2012). *Soil and Water Assessment Tool (SWAT) Input/Output Documentation Version 2012*. Texas Water Resources Institute. https://doi.org/10.1007/978-0-387-35973-1_1231
- 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/10.1016/S0899-9007\(00\)00483-4](https://doi.org/10.1016/S0899-9007(00)00483-4)
- Carrillo Serrano, M. E. (2010). *Modelación hidrológica semidistribuida de micro cuencas de diferente cobertura vegetal*. Universidad de Cuenca. Recuperado de <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/733>
- Chinnasamy, P., Bharati, L., Bhattarai, U., Khadka, A., Dahal, V., & Wahid, S. (2015). Impact of planned water resource development on current and future water demand in the Koshi River basin, Nepal. *Water International*, 40(7), 1004–1020.

<https://doi.org/10.1080/02508060.2015.1099192>

- Comisión Nacional del Agua. (2008). Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales. Recuperado de <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Contenido/Documentos/PortadaBANDAS.htm>
- Conrad, S. A., & Yates, D. (2018). Coupling stated preferences with a hydrological water resource model to inform water policies for residential areas in the Okanagan Basin, Canada. *Journal of Hydrology*, 564, 846–858. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.07.031>
- Cuceloglu, G., Abbaspour, K. C., & Ozturk, I. (2017). Assessing the water-resources potential of Istanbul by using a soil and water assessment tool (SWAT) hydrological model. *Water (Switzerland)*, 9(10), 814–832. <https://doi.org/10.3390/w9100814>
- Faiz, M. A., Liu, D., Fu, Q., Li, M., Baig, F., Ahmad Tahir, A., ... Cui, S. (2018). Performance evaluation of hydrological models using ensemble of General Circulation Models in the northeastern China. *Journal of Hydrology*, 565, 599–613. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.08.057>
- Flores-López, F., Galaitsi, S. E., Escobar, M., & Purkey, D. (2016). Modeling of Andean páramo ecosystems' hydrological response to environmental change. *Water (Switzerland)*, 8(3), 94. <https://doi.org/10.3390/w8030094>
- Hernández Vargas, M. Á. (2017). *Implementación de la herramienta WEAP al sistema Cutzamala*. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Höllermann, B., Giertz, S., & Diekkrüger, B. (2010). Benin 2025-Balancing future water availability and demand using the WEAP “Water Evaluation and Planning” System. *Water Resources Management*, 24(13), 3591–3613. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9622-z>
- Hund, S. V., Allen, D. M., Morillas, L., & Johnson, M. S. (2018). Groundwater recharge indicator as tool for decision makers to increase socio-hydrological resilience to seasonal drought. *Journal of Hydrology*, 563, 1119–1134. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.069>
- Hussen, B., Mekonnen, A., & Pingale, S. M. (2018). Integrated water resources management under climate change scenarios in the sub-basin of Abaya-Chamo , Ethiopia. *Modeling Earth*

- Systems and Environment*, 4(1), 221–240. <https://doi.org/10.1007/s40808-018-0438-9>
- Ingol-Blanco, E., & McKinney, D. C. (2013). Development of a hydrological model for the rio Conchos basin. *American Society of Civil Engineers*, 18(March), 340–351. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000607](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000607).
- Krause, P., Boyle, D. P., & Bäse, F. (2005). Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89–97. <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-89-2005>
- Laino-Guanes, R., Suárez-Sánchez, J., González-Espinosa, M., Musálem-Castillejos, K., Ramírez-Marcial, N., Bello-Mendoza, R., & Jiménez, F. (2017). Water balance and nutrient export modeling using WEAP: constraints to model the effects of forest restoration and climate change in the upper Grijalva river basin. *Aqua-LAC*, 9(2), 46–58. Recuperado de <http://www.unesco.org/new/fileadmin/MULTIMEDIA/FIELD/Montevideo/pdf/AquaLAC-Vo97N2-Set2017.pdf>
- López-García, T. G., Manzano, M. G., & Ramírez, A. I. (2017). Disponibilidad hídrica bajo escenarios de cambio climático en el Valle de Galeana, Nuevo León, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 8(1), 105–114.
- Maliehe, M., & Mulungu, D. M. M. (2017). Assessment of water availability for competing uses using SWAT and WEAP in South Phuthiatsana catchment, Lesotho. *Physics and Chemistry of the Earth*, 100(May 2012), 305–316. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2017.02.014>
- Mishra, B. K., Regmi, R. K., Masago, Y., Fukushi, K., Kumar, P., & Saraswat, C. (2017). Assessment of Bagmati river pollution in Kathmandu Valley: Scenario-based modeling and analysis for sustainable urban development. *Sustainability of Water Quality and Ecology*, 9–10, 67–77. <https://doi.org/10.1016/j.swaqe.2017.06.001>
- 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. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885–900.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniri, J. R., & Williams, J. R. (2011). *Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*. Texas: Texas A&M University College of

agriculture and life sciences.

- Olsson, T., Kämäräinen, M., Santos, D., Seitola, T., Tuomenvirta, H., Haavisto, R., & Lavado-Casimiro, W. (2017). Downscaling climate projections for the Peruvian coastal Chancay-Huaral Basin to support river discharge modeling with WEAP. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *13*, 26–42. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.05.011>
- Salgado, J. H., & Güitrón, A. (2012). Aplicabilidad de los modelos hidrológicos distribuidos. En *XXII Congreso Nacional de Hidráulica* (p. 5). Acapulco, Guerrero, México.
- Sánchez-Galindo, M. (2015). *Calibración y validación del modelo SWAT en la cuenca del río Sordo en el estado de Oaxaca, México*. Colegio de Postgraduados.
- Sánchez-Galindo, M., Fernández-Reynoso, D. S., Martínez-Méñez, M. R., Rubio-Granados, E., & Ríos-Berber, J. D. (2017). Modelo hidrológico de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México, con SWAT. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *8*(5), 141–156. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2017-05-10>
- Sánchez-Torres Esqueda, G., Ospina-Noreña, J. E., Gay-García, C., & Conde, C. (2011). Vulnerability of water resources to climate change scenarios. Impacts on the irrigation districts in the Guayalejo-Tamesí River Basin, Tamaulipas, México. *Atmósfera*, *24*(1), 141–155.
- Sandoval-Solis, S., Mckinney, D. C., Teasley, R. L., & Patino-Gómez, C. (2011). Groundwater banking in the rio Grande basin. *Journal of Water Resources Planning and Management*, *137*(1), 62–71. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)WR.1943-5452.0000091](https://doi.org/10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000091)
- Sieber, J., & Purkey, D. (2015). *User Guide for WEAP 2015*. Recuperado de https://www.weap21.org/downloads/WEAP_User_Guide.pdf
- Singh, V. P., & Woolhiser, D. A. (2002). Mathematical modeling of watershed hydrology. *Journal of Hydrologic Engineering*, *7*(4), 270–292. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0699\(2002\)7:4\(270\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0699(2002)7:4(270))
- Stockholm Environment Institute. (2016). *Water Evaluation And Planning System Tutorial*. Recuperado de https://www.weap21.org/downloads/WEAP_Tutorial.pdf

- Suárez, J., Muñoz, H., Orozco, S., Sánchez-Torres, G., Ritter, W., Carreón, M. F., ... Treviño, J. (2009). Disponibilidad de agua y el cambio climático global en la subcuenca del río Zahuapan, Tlaxcala, México. *Gestión Ambiental*, 18, 46–61.
- Varela-Ortega, C., Blanco-Gutiérrez, I., Esteve, P., Bharwani, S., Fronzek, S., & Downing, T. E. (2016). How can irrigated agriculture adapt to climate change? Insights from the Guadiana basin in Spain. *Regional Environmental Change*, 16(1), 59–70. <https://doi.org/10.1007/s10113-014-0720-y>
- Weber, J. F., Jorquera, E., & Dasso, C. M. (2011). Estimación de parámetros y análisis de incertidumbre de un modelo hidrológico continuo para dos cuencas de la región serrana de Córdoba. En *XXIII Congreso Nacional del Agua* (pp. 156–187). Resistencia, Chaco, Argentina.
- Williams, J. R., & Hann, R. W. (1972). Hymo, a problem-oriented computer language building hydrologic models. *Water Resources Research*, 8(1), 79–86.
- WWF. (2014). Tasa de la transformación de la vegetación en el área de intervención del proyecto Mixteca. Oficina de la World Wildlife Fund en Oaxaca. Recuperado de <http://www.proyectomixteca.org.mx/servidor-cartografico/>
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., & Huber-Lee, A. (2005). WEAP21—A Demand-, Priority-, and Preference-Driven Water Planning Model. Part 1: Model Characteristics. *Water International*, 30(4), 487–500.
- Yaykiran, S., Cuceloglu, G., & Ekdal, A. (2019). Estimation of water budget components of the Sakarya River basin by using the WEAP-PGM model. *Water (Switzerland)*, 11(2), 271–288. <https://doi.org/10.3390/w11020271>