

SWAT

(Soil and Water Assessment Tool)

Conceptos básicos y guía rápida para el usuario

Versión SWAT2005

Por NATALIA URIBE

Adaptado de: Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. 2005. Soil and Water Assessment Tool – Theoretical Documentation. Grassland, Soil and Water Research Laboratory –Agricultural Research Service. Blackland Research Center – Texas Agricultural Experiment Station. Temple - Texas, USA.

20 de Abril del 2010

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCION	3
1. DESARROLLO DEL SWAT	4
2. DESCRIPCION GENERAL DEL SWAT	6
2.1 FASE TERRESTRE DEL CICLO HIDROLOGICO	7
2.1.1 CLIMA.....	8
2.1.2. HIDROLOGIA.....	10
2.1.3 COBERTURA DE TIERRA/CRECIMIENTO DE PLANTA.....	14
2.1.4 EROSION	15
2.1.5 NUTRIENTES	16
2.1.6 PESTICIDAS	18
2.1.7 MANEJO.....	19
2.2 FASE DE ENRUTAMIENTO DEL CICLO HIDROLOGICO.....	19
2.2.1 ENRUTAMIENTO EN EL CANAL PRINCIPAL O ALCANCE.....	20
2.2.2 ENRUTAMIENTO EN LOS DEPOSITOS/RESERVAS	21
3. APLICACIÓN DEL MODELO SWAT.....	23
3.1 PREPARANDO LOS DATOS DE ENTRADA.....	24
3.2 USANDO LA INTERFACE ARCSWAT	27
3.2.1 SWAT PROJECT SETUP	28
3.2.2 WATERSHED DELINEATOR MENU	29
3.2.3 HRU ANALYSIS MENU	35
3.2.4 WRITE INPUT TABLES MENU.....	39
3.2.5 EDIT SWAT INPUT MENU	42
3.2.6 SWAT SIMULATION MENU	42
REFERENCIAS.....	46

INTRODUCCION

SWAT son las siglas de Herramienta para la Evaluación del Suelo y Agua para una cuenca hidrográfica; el modelo a escala fue desarrollado por Dr. Jeff Arnold para el USDA el Servicio Agrícola de Investigación (ARS). SWAT fue desarrollado 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.

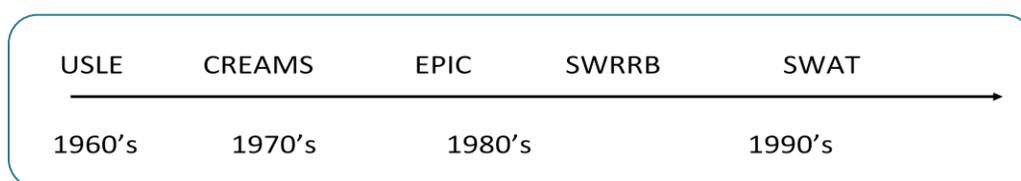
SWAT es un modelo continuo de tiempo, es decir un modelo conformado a largo plazo, que no está diseñado para simular un solo-acontecimiento de flujo detallado. El SWAT requiere información específica sobre el clima y tiempo, propiedades de suelos, topografía, vegetación y prácticas de manejo de tierra que acontecen en las cuencas para utilizar estas como datos de entrada. Los procesos físicos asociados con el movimiento del agua, movimiento de sedimento, desarrollo de cosecha, ciclo de nutrientes, etc. son modelados directamente por SWAT.

Los beneficios de este enfoque son:

- Interface grafica ArcGIS , la cual hace más sencillo su manejo y utilización
- el impacto relativo de una variación en los datos de entrada (por ejemplo; cambios en prácticas de gestión, clima, vegetación, etc.)
- método ágil de extrapolación e integración de la información
- simulación dirigida
- disponibilidad inmediata de datos de entrada y salida
- amplio proceso de iteraciones de procesos físicos

1. DESARROLLO DEL SWAT

SWAT integra características de varios modelos de ARS y es una consecuencia directa del modelo SWRRB1 (Simulador para Recursos de Agua en Cuencas Hidrográficas Rurales) (William et Al., 1985; Arnold et Al., 1990). Los modelos específicos que contribuyeron significativamente al desarrollo del SWAT fueron CREAMS2 (Sustancias Químicas, Escorrentías, y la Erosión de Sistemas de Gestión Agrícola) (Knisel, 1980), GLEAMS3 (Efectos de la carga de Agua Subterránea en Sistemas de Gestión Agrícola) (Leonard et Al., 1987), y EPIC4 (Calculadora del Impacto de la Erosión-Productividad) (William et Al., 1984).



El desarrollo de SWRRB empezó con una modificación del modelo diario de la hidrología de lluvia de CREAMS. Los mayores cambios hechos al modelo de la hidrología de CREAMS fueron: a) el modelo fue ampliado para permitir cálculos simultáneos en varias sub-cuencas para predecir la producción de agua en cuencas; a) agua subterránea o componente de flujo de retorno fueron agregados; c) un componente de almacenamiento de depósito fue agregado para calcular el efecto de estanques en granjas y depósitos en la producción de agua y sedimento; d) un modelo de simulación de tiempo que integra los datos para lluvia, radiación solar, y temperatura fueron agregados para facilitar simulaciones a largo plazo y proporcionar clima representativo de forma temporal y espacial; e) el método para predecir promedios máximas de escorrentía fueron mejoradas; f) el modelo EPIC de desarrollo de cosechas fue agregado para justificar la variación anual en el crecimiento; g) un componente de enrutamiento flujo fue agregado; h) componentes de transporte de sedimento fueron agregados para simular movimiento de sedimento a través de estanques, depósitos, corrientes y valles; y i) cálculo de transmisión de pérdidas fue integrado.

Mientras SWRRB fue utilizado fácilmente para cuencas de hasta unos escasos cientos de kilómetros cuadrados en tamaño, se buscaba simular el flujo de corriente para las cuencas que se extendían a más de varios mil kilómetros cuadrados. Para un área tan extensa las cuencas bajo el estudio debían ser divididas en cientos de sub-cuencas. La división de las cuencas en el SWRRB era limitada a diez sub-cuencas y el modelo dirigía el agua y sedimentos fuera de la sub-cuenca directamente a la salida de la cuenca. Estas limitaciones llevaron al desarrollo de un modelo llamado ROTO

(dirigiendo las salidas al vertedero) (Arnold et Al., 1995), que tomó las salidas de múltiples recorridos de SWRRB redirigió los flujos por canales y reservas (depósitos).

ROTO proporcionó enfoque que venció la limitación de sub-cuenca de SWRRB "uniendo" múltiples SWRRB recorridos juntos. Aunque este enfoque fue muy efectivo, la entrada y salida de múltiples archivos de SWRRB requería un almacenamiento considerable de información computarizada. Además, todos los recorridos de SWRRB debían ser hechas independientemente y luego ingresadas a ROTO para el enrutamiento al canal y depósito. Para vencer la dificultad de este arreglo, SWRRB y ROTO fueron fusionados en un solo modelo, el SWAT. Que permite simulaciones de áreas muy extensas y retuvo todas las características que hicieron SWRRB un modelo de simulación tan valioso.

Desde que SWAT fue creado a principios de los años noventa, ha experimentado revisión y expansión continua de sus capacidades. Las mejoras más significativas del modelo incluyen:

SWAT94.2: Múltiples unidades de respuesta hidrológicas (HRUs, integrados).

SWAT96.2: La auto-fertilización y la auto-irrigación agregados como opciones de gestión; almacenamiento de agua de dosel incorporada; un componente CO₂ agregado para el modelo de desarrollo de cosechas, estudios de cambio climáticos; agregada la ecuación potencial de evapotranspiración Penman-Monteith; incorporado el flujo de agua lateral en el suelo, basada en el modelo cinemático de almacenamiento; integradas las ecuaciones de calidad de agua y nutrientes de QUAL2E; enrutamiento de pesticida en corrientes.

SWAT98.1: rutinas mejoradas de derretimiento de nieve; mejorada la calidad de agua en-corriente; rutinas expandidas de ciclo de nutrientes; efecto rasante, aplicaciones de abono, y drenaje de flujo agregado como opciones de gestión; modificación del modelo para el uso en el hemisferio sur.

SWAT99.2: rutinas mejoradas de ciclo de nutrientes, depósito/estanque/eliminación de nutrientes de humedales por asentamiento; agregándose almacenamiento de bancos de agua al alcance; enrutamiento de metales al alcance; construcción urbana/ecuaciones de deslave de SWMM agregadas junto con ecuaciones de regresión de USGS.

SWAT2000: rutinas de transporte de bacterias; infiltración de Green & Ampt; generador del tiempo mejorado; permite radiación solar diaria, humedad relativa, y velocidad de viento para ser leído o generado; permite valores de ET para ser leídos o calculados; todos los métodos potenciales ET revisados; los procesos de banda de elevación mejorados; simulación permitida de un número

ilimitado de depósitos; método de enrutamiento de Muskingum agregado; cálculos modificados del estado latente para la simulación apropiada en áreas tropicales.

SWAT2005: se agregaron y mejoraron rutinas mejoradas de transporte de bacterias; escenarios de pronóstico del tiempo agregados; generador de precipitación sub-diaria; el parámetro de retención utilizado en el cálculo diario de CN puede ser una función del contenido de agua del suelo o evapotranspiración de planta.

Además de los cambios enumerados anteriormente, las interfaces para el modelo han sido desarrolladas en Windows (Visual Basic), GRASS, ArcView y ArcGIS. SWAT también ha experimentado una validación extensión de aplicaciones e implementación del modelo a nivel mundial.

2. DESCRIPCION GENERAL DEL SWAT

SWAT permite varios procesos físicos diferentes para ser simulados en una cuenca hidrográfica. Estos procesos serán resumidos brevemente en esta sección. Para discusiones más detalladas de los diversos procedimientos, consultar en la página <http://swatmodel.tamu.edu/> el capítulo dedicado al tema de interés en el manual teórico del modelo.

Para propósitos de la simulación, la cuenca hidrográfica será dividida en un número de sub-vertientes o sub-cuencas. El uso de sub-vertientes en la simulación es muy útil, particularmente, cuando hay diversas áreas de la misma cuenca, que se ven afectadas por el uso de suelos o suelos bastante desiguales de tal forma, que impactan grandemente la hidrología del sector. Al dividir la cuenca hidrográfica en sub-cuencas, el usuario puede referirse a diversas áreas de la vertiente de acuerdo al espacio. La información de entrada para cada sub-vertiente es agrupada u organizada en las categorías siguientes: clima; unidades de respuesta hidrológicas o HRUs; estanques/humedales; agua subterránea, canal principal y drenando la sub-cuenca. Las unidades de respuesta hidrológicas son áreas de tierra dentro de la sub-cuenca que corresponden a todas las únicas posibles combinaciones de cobertura de tierra, suelo, y pendiente en la cuenca.

La simulación hidrológica de la cuenca puede ser separada en dos divisiones mayores. La primera división es la *Fase Terrestre del Ciclo Hidrológico* (Figura 1), esta fase controla la cantidad de agua, sedimentos, las cargas de alimento nutritivo y de pesticida al canal principal en cada sub-

cuenca; la segunda división es la *Fase de Enrutamiento del Ciclo Hidrológico*, la cual define el movimiento del agua, sedimentos, etc. a través de la red de canales de la cuenca hidrográfica hacia el vertedero.

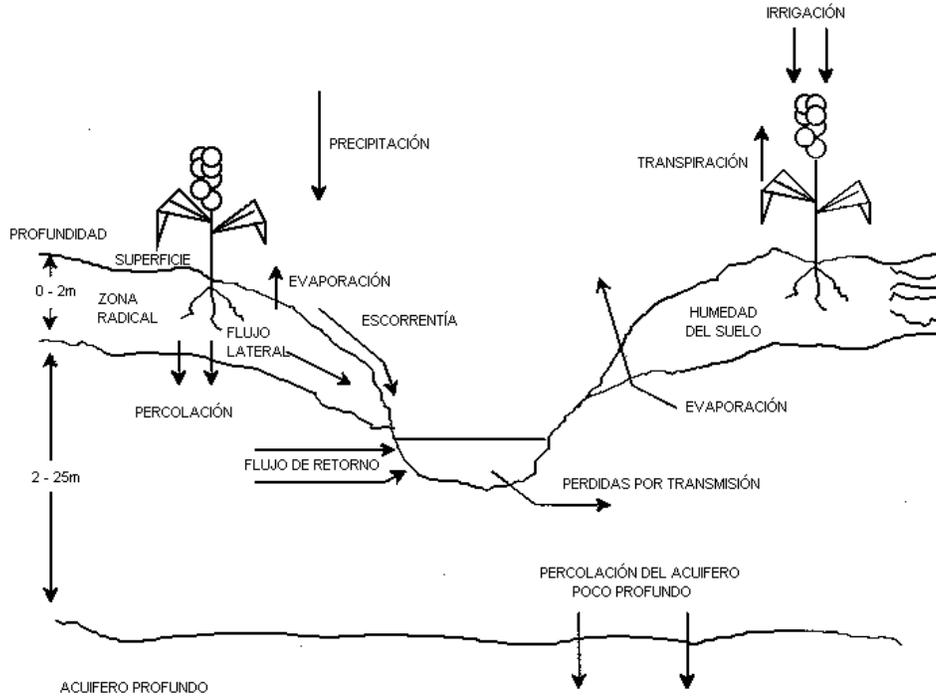


Figura 1: Representación ciclo hidrológico en SWAT.

2.1 FASE TERRESTRE DEL CICLO HIDROLOGICO

El ciclo hidrológico es simulado por SWAT basado en la ecuación del equilibrio de agua:

$$SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

dónde SW_t es el contenido final de agua en el suelo ($mm H_2O$), SW_0 es el contenido inicial de agua del suelo en un día i ($mm H_2O$), t es el tiempo (días), R_{day} es la cantidad de precipitación en un día i ($mm H_2O$), Q_{surf} es la cantidad de escorrentía de la superficie en un día i ($mm H_2O$), E_a es la cantidad de evapotranspiración en día i ($mm H_2O$), W_{seep} es la cantidad de agua que percola en el perfil del suelo en un día i ($mm H_2O$), y Q_{gw} es la cantidad de flujo de retorno en un día i ($mm H_2O$).

La subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar las diferencias en la evapotranspiración para varias cosechas y suelos. Las escorrentías son predichas separadamente para cada HRU y dirigidas para obtener las escorrentías totales para la cuenca. Esto aumenta la certeza y da una mejor descripción física del equilibrio del agua. Las diferentes entradas y procesos implicados en esta fase del ciclo hidrológico, son resumidos en las secciones siguientes.

2.1.1 CLIMA

El clima de una cuenca proporciona las entradas de humedad y energía, que controlan el equilibrio del agua y determinan la importancia relativa de los diferentes componentes del ciclo hidrológico. Las variables climáticas necesarias por SWAT consisten en precipitación diaria, temperatura aérea máxima/mínima, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. El modelo permite valores para la precipitación diaria, temperaturas aéreas máximas/mínimos, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa para ser ingresados por registros de datos observados o generados durante la simulación.

GENERADOR DE CLIMA

Los valores diarios para el clima son generados del promedio de valores mensuales. El modelo genera un conjunto de datos del tiempo para cada sub-cuenca. Los valores para cualquiera de las sub-cuencas serán generadas independientemente y no habrá correlación espacial de valores generados entre las diferentes sub-cuencas.

PRECIPITACION GENERADA

SWAT utiliza un modelo desarrollado por Nicks (1974) para generar precipitación diaria para simulaciones que no leen datos medidos. Este modelo de precipitación también es utilizado para llenar los datos faltantes en los registros medidos. El generador de la precipitación utiliza un modelo de cadena de primer-orden de Markov para definir un día como húmedo o seco comparando un número al azar (0.0-1.0) generado por el modelo a probabilidades húmedo-secas mensuales ingresadas por el usuario. Si el día se clasifica como húmedo, la cantidad de precipitación se genera de una distribución sesgada o una distribución exponencial modificada.

PATRONES DE LLUVIA SUB-DIARIA

Si valores sub-diarios de precipitación se necesitan, una doble función exponencial se utiliza para representar los patrones de intensidad dentro de una tormenta. Con la doble distribución exponencial, la intensidad de lluvia aumenta de manera exponencial con tiempo al máximo, o pico,

de la intensidad. Una vez que la intensidad máxima es alcanzada, la intensidad de lluvia disminuye de manera exponencial con el tiempo hasta el fin de la tormenta

TEMPERATURA AEREA GENERADA Y RADIACION SOLAR

Las mínimas y máximas temperaturas aéreas y la radiación solar son generadas de una distribución normal. Una ecuación de la continuidad es integrada en el generador para justificar variaciones de temperatura y radiación causadas por condiciones secas vs lluviosas. La temperatura aérea máxima y la radiación solar se ajustan hacia abajo al simular condiciones lluviosas y al simular hacia arriba condiciones secas. Los ajustes son hechos para que los valores generados a largo plazo para un promedio de temperatura máxima mensual y radiación solar mensual, concuerden con los promedios de entrada.

VELOCIDAD DEL VIENTO GENERADA

Una ecuación exponencial modificada es utilizada para generar una media de viento diario dando la media mensual de la velocidad del viento.

HUMEDAD RELATIVA GENERADA

El modelo genera la humedad relativa utilizando una distribución triangular para simular la humedad relativa, media y diaria del promedio mensual. Al igual que con temperatura y radiación, la media de humedad relativa es ajustada para justificar efectos de día húmedo - y seco.

COBERTURA DE NIEVE

SWAT clasifica la precipitación como lluvia o lluvia/nieve usando el promedio temperatura diaria. El componente de cobertura de nieve del SWAT ha sido actualizado de un modelo sencillo y uniforme de la cobertura de nieve a un modelo más complejo que permite cobertura no uniforme debido a la sombra, alineación, topografía y cobertura de tierra. El usuario define una profundidad de nieve por encima de la que la nieve siempre se extenderá más del 100% del área. Cuando la profundidad de la nieve en una sub-cuenca disminuye debajo de este valor, la cobertura de nieve permite disminuir no-linealmente basado en una curva de reducción de área.

DERRETIMIENTO DE NIEVE

El derretimiento de la nieve es controlado por el aire y la temperatura del paquete de nieve, la proporción de derretimiento, y la cobertura de área de la nieve. Si la nieve esta presente, esta se derrite los días cuando la temperatura máxima excede 0°C usando una función lineal de la

diferencia entre el paquete promedio de nieve y la temperatura aérea máxima, y la temperatura base o umbral para el derretimiento de nieve. La nieve derretida es tratada igual que como lluvia para estimar escorrentía y filtración. Para el derretimiento de nieve, la energía de lluvia es puesta en cero y las escorrentías máximas valoradas son estimadas asumiendo nieve uniformemente derretida para una duración de 24 horas.

BANDAS DE ELEVACION

El modelo permite a las cuencas dividirse en un máximo de diez bandas de elevación. La cobertura de nieve y el derretimiento de nieve son simuladas separadamente para cada banda de elevación. Dividiendo la sub-cuenca en bandas de elevación, el modelo puede valorar las diferencias en la cobertura de nieve y el derretimiento causado por la variación orográfica en la precipitación y la temperatura.

TEMPERATURA DEL SUELO

La temperatura del suelo impacta el movimiento del agua y la tasa de decrecimiento del residuo en la tierra. La temperatura diaria promedio del suelo se calcula en la superficie del suelo y el centro de cada capa de suelo. La temperatura de la superficie del suelo es una función de la cobertura de nieve, cobertura de planta y cobertura de residuo, la temperatura en la superficie descubierta de suelo, y la temperatura en la superficie de la tierra del día anterior. La temperatura de una capa de suelo es una función de la temperatura en la superficie, media anual de la temperatura aérea y la profundidad en el suelo en el cuál se da una variación en la temperatura debido a los cambios en las condiciones climáticas que ya no ocurren. Esta profundidad, referida como la profundidad húmeda, es dependiente sobre la densidad bruta y el contenido de agua del suelo.

2.1.2. HIDROLOGIA

Cuando la precipitación desciende, puede ser interceptada y puede ser contenida en el dosel de la vegetación o cae a la superficie del suelo. El agua en la superficie del suelo se infiltrará en el perfil de la tierra o fluirá sobre el terreno como escorrentía. La escorrentía se mueve relativamente rápido hacia un canal de corriente y contribuye en un corto plazo en la corriente. El agua infiltrada puede ser contenida en el suelo y evapotranspirada posteriormente o puede avanzar lentamente al sistema de agua-superficie a través de pasos subterráneos. Las conductos potenciales de movimiento de agua simulados por SWAT en las HRU son ilustradas en la Figura 2.

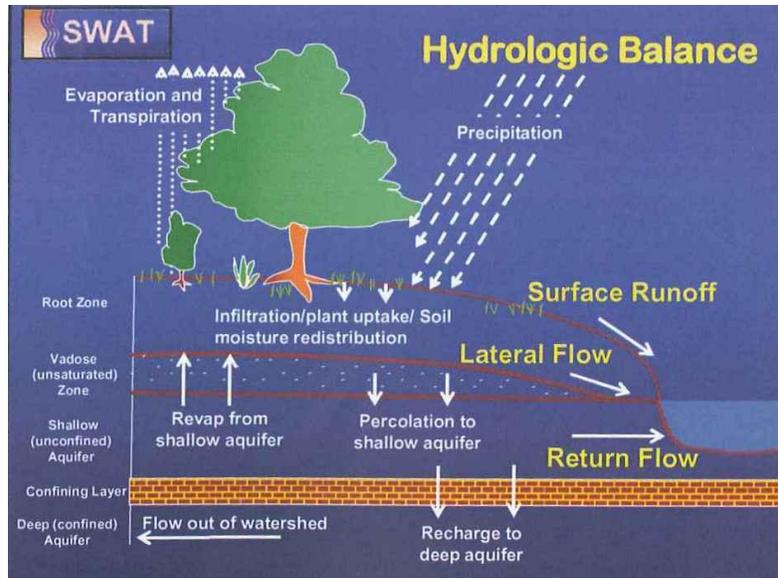


Figura 2: Representación movimientos del agua en SWAT.

ALMACENAMIENTO DE DOSEL

El almacenamiento del dosel es el agua interceptada por superficies vegetativas (el dosel) donde se mantiene y se hace disponible para la evaporación. Cuando se usa el método de curva numérica CN para computar escorrentía de superficie, el almacenamiento de dosel se toma en cuenta en los cálculos de superficie de escorrentía. Sin embargo, si los métodos como Green & Ampt se usan para modelar infiltración y escorrentías, el almacenamiento de dosel debe ser modelado separadamente. SWAT permite al usuario a ingresar la cantidad máxima de agua que puede ser almacenada en el dosel en el índice máximo de área de hoja para la cobertura de tierra. Este valor y el índice del área de la hoja son utilizados por el modelo para computar el almacenamiento máximo en tiempo en el ciclo de desarrollo de la cobertura de tierra/cosecha. Cuando la evaporación es computada, el agua primero se remueve del almacenamiento de dosel.

INFILTRACION

La infiltración se refiere a la entrada de agua en un perfil de suelo de la superficie terrestre. Cuando la infiltración continúa, la tierra llega a ser cada vez más húmeda, causando que el promedio de infiltración disminuya con el tiempo hasta que alcance un valor constante. La tasa inicial de infiltración depende del contenido de humedad de la tierra antes de la introducción de agua en la superficie terrestre. La tasa final de infiltración equivale a la conductividad hidráulica saturada de la tierra. La cantidad de agua que entra el perfil de tierra se calcula como la diferencia entre la cantidad de lluvia y la cantidad de escorrentía de superficie. El método de infiltración Green &

Ampt modela directamente la infiltración, pero requiere los datos de precipitación en incrementos más pequeños de tiempo.

REDISTRIBUCIÓN

La redistribución se refiere al movimiento continuo de agua por un perfil de tierra después de la entrada del agua (a través de precipitación o irrigación). La redistribución es causada por diferencias en el contenido de agua en el perfil. Una vez que el contenido de agua a través del perfil entero es uniforme, la redistribución cesará. El componente de la redistribución de SWAT usa un almacenamiento que dirige la técnica para predecir el flujo por cada capa de tierra en la zona principal. El flujo hacia abajo, o la filtración, ocurre cuándo la capacidad de espacio de una capa de tierra es excedida y la capa debajo no está saturada. La tasa del flujo es gobernada por la conductividad saturada de la capa de tierra. La redistribución es afectada por la temperatura del suelo. Si la temperatura en una capa particular es de 0°C o debajo, ninguna redistribución es permitida en esta capa.

EVAPOTRANSPIRATION

La evapotranspiración es un término colectivo para todos procesos en el que agua en fase líquida o sólida o cerca de la superficie terrestre se convierte en vapor atmosférico. La evapotranspiración incluye evaporación de ríos y lagos, suelo descubierto, y superficies vegetativas; evaporación de dentro de las hojas de plantas (transpiración); y la sublimación de superficies de hielo y nieve. El modelo computa la evaporación de suelos y plantas separadamente descrito por Ritchie (1972). La evaporación verdadera del agua en el suelo se estima utilizando funciones exponenciales de profundidad de suelo y contenido de agua. La transpiración de la planta se simula como una función lineal de la evapotranspiración potencial e índice de área de hoja.

EVAPOTRANSPIRATION POTENCIAL

La evapotranspiración potencial es la proporción en la cual la evapotranspiración ocurriría en una gran área cubierta uniformemente y completamente con vegetación creciente que tiene acceso a un suministro ilimitado de agua terrestre. Esta proporción se asume para ser no afectada por efectos micro-climáticos de procesos como advección o calor de almacenamiento. El modelo SWAT ofrece tres opciones para estimar la evapotranspiración potencial: Hargreaves (Hargreaves et Al., 1985), Priestley-Taylor (Priestley y Taylor, 1972), y Penman-Monteith (Monteith, 1965).

FLUJO SUBTERRANEO LATERAL

El flujo, o inter-flujo subterráneo lateral, es una contribución de la corriente de flujo que se origina debajo de la superficie pero por encima de la zona donde las piedras están saturadas con agua. El flujo subterráneo lateral en el perfil de suelo (0-2m) se calcula simultáneamente con redistribución. Un modelo cinemático del almacenamiento se utiliza para predecir el flujo lateral en cada capa de tierra.

ESCORRENTIAS DE SUPERFICIE

Las escorrentías en la superficie, o flujo terrestre, es el flujo que ocurre a lo largo de una superficie inclinada. Utilizando las cantidades diarias o sub-diarias de lluvia, el SWAT simula volúmenes de superficie de escorrentías y promedios máximos de escorrentías para cada HRU. Este es computado utilizando una modificación del método de curva numérica del SCS (Servicio de Conservación de Suelo del USDA, 1972) o el método de infiltración de Green & Ampt (Green y Ampt, 1911). En el método de curva numérica, la curva varía no-linealmente con el contenido de humedad del suelo. La curva numérica baja si la tierra se acerca el punto de marchitez y aumenta hasta cerca de 100 al acercarse el suelo a la saturación.

El método de Gree & Ampt requiere los datos sub-diarios de precipitación y calcula la infiltración como una función del frente potencial mátrico húmedo anterior y conductividad hidráulica efectiva. El agua que no se infiltra se convierte en escorrentía de superficie. El SWAT incluye una provisión para estimar escorrentías de suelo congelado donde un suelo se define como congelado si la temperatura en la primera capa es menos de 0°C.

ESTANQUES

Los estanques son estructuras de almacenamiento de agua situados dentro de una sub-cuenca que intercepta escorrentías de superficie. El almacenamiento del agua del estanque es una función de la capacidad del estanque, afluencias y desagües diarios, la infiltración y la evaporación. Las entradas necesarias son la capacidad de almacenaje y el área del estanque cuando se llena a su capacidad. El área debajo de la capacidad se estima como una función no lineal de almacenamiento.

PERDIDAS DE TRANSMISION

Las pérdidas de transmisión son pérdidas de flujo de superficie a través de la lixiviación por el cauce. Este tipo de pérdida ocurre en corrientes efímeras o intermitentes donde la contribución del agua subterránea ocurre sólo en cierto tiempo del año, o del todo en absoluto. El SWAT utiliza el

método de Lane descrito en el Capítulo 19 de la Guía de la Hidrología del SCS (Servicio de Conservación de Suelo del USDA, 1983) para estimar la transmisión de pérdidas. Las pérdidas de agua del canal son una función del ancho del canal y la duración de longitud y flujo. Tanto la proporción de volumen como la proporción máxima se ajustan cuándo las pérdidas de transmisión ocurren en canales tributarios.

FLUJO DE RETORNO

El flujo del retorno, o flujo de base, es el volumen de agua subterránea originado en el manto freático. El SWAT divide el agua subterránea en dos sistemas de acuíferos: un acuífero superficial y libre, que contribuye al flujo de regreso a las corrientes dentro de la cuenca hidrográfica y un acuífero profundo y limitado que contribuye al flujo de regreso a las corrientes fuera de la cuenca (Arnold et Al., 1993). El agua que filtra más allá del fondo de la zona de raíz se divide en dos fracciones—cada fracción se convierte en recarga para cada uno de los acuíferos. Además de retornar al flujo, el agua almacenada en el acuífero superficial puede abastecer de nuevo humedad en el perfil del suelo en condiciones muy secas o es absorbido directamente por la planta.

2.1.3 COBERTURA DE TIERRA/CRECIMIENTO DE PLANTA

El SWAT utiliza un solo modelo de crecimiento de plantas para simular toda clase de coberturas de tierra. El modelo puede diferenciar entre plantas anuales y perennes. Las plantas anuales crecen de la fecha de plantación a la fecha de cosecha o hasta que las unidades de calor acumuladas igualen las unidades potenciales de calor para la planta. Las plantas perennes mantienen sus sistemas de raíz a través del año, llegando a ser inactiva en los meses de invierno. Ellas reanudan el crecimiento cuando el promedio de temperatura aérea diaria excede el mínimo, o la base, la temperatura requerida. El modelo del crecimiento de la planta es utilizado para valorar la eliminación de agua y nutrientes de la zona de la raíz, transpiración y la producción de biomasa.

CRECIMIENTO POTENCIAL

El incremento potencial en la biomasa de planta en un día dado es definido como el aumento en la biomasa bajo condiciones ideales de crecimiento. El aumento potencial en la biomasa por un día es una función de la energía interceptada y la eficiencia de la planta para convertir energía hacia la biomasa. La intercepción de la energía es estimada como una función de la radiación solar e índice del área de la hoja de la planta.

TRANSPIRACION ACTUAL Y POTENCIAL

El proceso usado para calcular la transpiración potencial de plantas es descrita en la sección de la evapotranspiración. La transpiración verdadera es una función de la transpiración potencial y disponibilidad de agua de tierra.

ABSORCION DE NUTRIENTES

El uso de nitrógeno y fósforo en plantas se estima con un enfoque de oferta y demanda donde el nitrógeno diario de la planta y demandas de fósforo son calculados por la diferencia entre la concentración verdadera del elemento en la planta y la concentración óptima. La concentración óptima de los elementos varía con la etapa de crecimiento así como es descrito por Jones (1983).

LIMITE/RESTRICCIÓN DE CRECIMIENTO

El crecimiento potencial de la planta y el rendimiento generalmente no son logrados debido a limitaciones impuestas por el ambiente. El modelo estima presión ocasionada por el agua, los nutrientes y la temperatura.

2.1.4 EROSION

La producción de erosión y sedimento se estima para cada HRU con la ecuación modificada de pérdida universal de suelo (MUSLE) (William, 1975). Mientras el USLE utiliza lluvia como un indicador de energía erosiva, MUSLE utiliza la cantidad de pérdidas para simular la producción de erosión y sedimento.

$$sed = 11.8 \cdot (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0.56} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG$$

sed: Producción sedimentos en un día dado (Toneladas metricas)

Q_{surf}: Volumen de superficie de escorrentía

q_{peak}: escorrentía máxima

area_{hru}: área de HRU

K_{usle}: factor de erodabilidad del suelo

C_{usle}: factor de cobertura y gestión de USLE

P_{usle}: factor de prácticas de conservación de USLE

LS_{usle}: factor topográfico

CFRG: Factor fragmento macro

La sustitución tiene como resultado varios beneficios: la certeza de predicción del modelo se incrementa, la necesidad para una proporción de entrega se elimina, y una sola tormenta de producción de sedimento pueden ser calculadas. El modelo en la parte de la hidrología suministra

estimaciones de volumen de escorrentía y una tasa máxima de escorrentía que con el área de la sub-cuenca se utiliza para calcular la energía variable erosiva de escorrentía. El factor de manejo de cosecha se calcula nuevamente cada día que la escorrentía ocurre. Es una función de la biomasa en la superficie, del residuo del suelo en la superficie, y el factor C mínimo para plantas. Otros factores de la ecuación de erosión son evaluados como los descritos por Wischmeier y Smith (1978).

2.1.5 NUTRIENTES

El SWAT rastrea el movimiento y la transformación de las diversas formas de nitrógeno y fósforo en las cuencas. En el suelo la transformación de nitrógeno de una forma u otra es regida por el ciclo del nitrógeno como se representa en la Figura 3. La transformación del fósforo en el suelo es controlado por el ciclo del fósforo mostrado en la Figura 4. Los nutrientes pueden ser introducidos a los canales principales y transportados río abajo por escorrentía y flujo superficial o subterráneo lateral.

NITROGENO

Los diferentes procesos modelados por SWAT en el HRUs y las varias piscinas de nitrógeno en la tierra son representados en la Figura 3. El uso de nitrógeno por las plantas se estima utilizando el enfoque de oferta y demanda descrito en la sección en el crecimiento de plantas. Adicionalmente al uso de las plantas, el nitrato y el N orgánico pueden ser removidos de la tierra a través del flujo masivo del agua. Las cantidades de NO₃-N contenidas en las escorrentías, flujo lateral y filtración son estimados como productos del volumen de agua y la concentración de nitrato en la capa. El transporte del N orgánico con sedimento, es calculado, con una función de la carga desarrollada por McElroy et Al. (1976) y modificado por William y Hann (1978) para la aplicación a acontecimientos individuales de escorrentías. La función de la carga estima la pérdida diaria de escorrentías del N orgánico basada en la concentración del N orgánico en la primera capa de suelo, en la producción de sedimento y en la proporción de enriquecimiento. La proporción del enriquecimiento es la concentración del N orgánico en el sedimento dividido por eso en el suelo.

NITROGENO

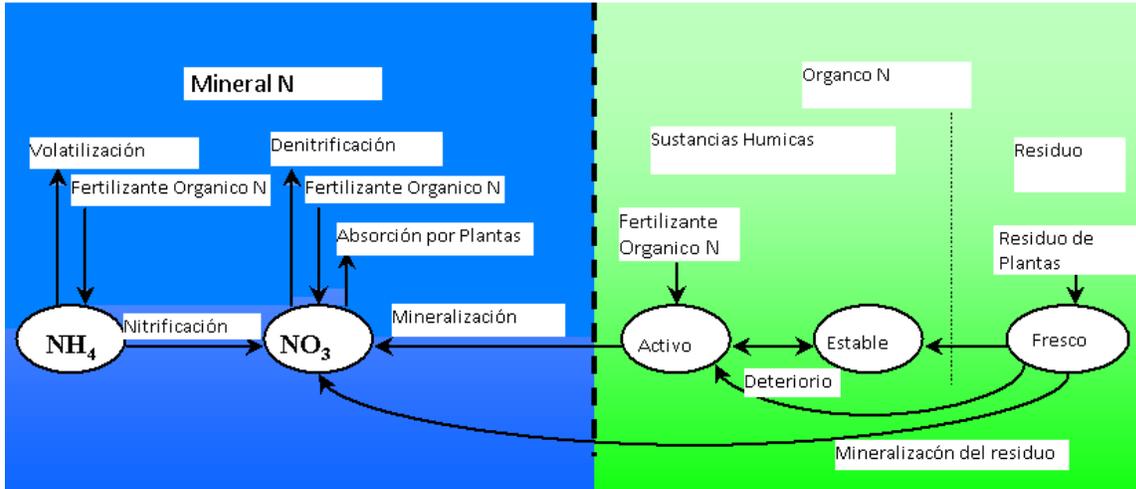


Figura 3: División del Nitrógeno en SWAT

FOSFORO

El uso del fósforo para las plantas se estima utilizando el enfoque de oferta y demanda descrito en la sección en el crecimiento de planta. Adicionalmente al uso por las plantas el fósforo soluble y P orgánico pueden ser removidos de la tierra a través del flujo masivo de agua. El fósforo no es un nutriente móvil y la interacción entre escorrentías de superficie con solución P en los primeros 10 mm de suelo no serán completos. La cantidad de P soluble removido en las escorrentías se predice utilizando la concentración de solución P en los primeros 10 mm de suelo, el volumen de escorrentías más un factor de división.

Fósforo

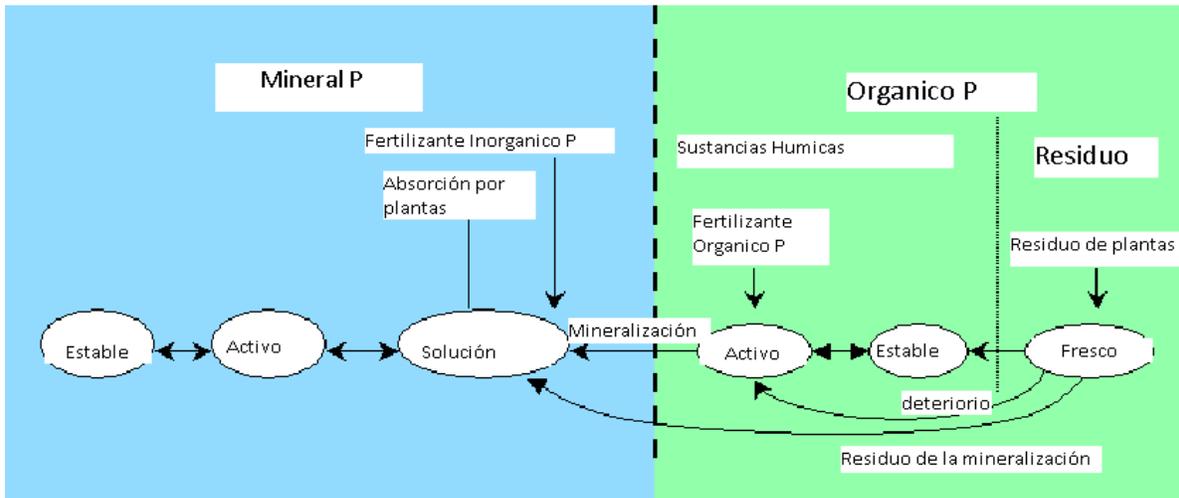


Figura 4: División del Fósforo en SWAT

2.1.6 PESTICIDAS

Aunque SWAT no simule la presión ocasionada en el crecimiento de una planta debido a la presencia de hierbas, daño por insectos y otras plagas, los pesticidas pueden ser aplicados a un HRU para estudiar el movimiento de la sustancia química en la cuenca. SWAT simula el movimiento de pesticidas en la red de corrientes a través vía de escorrentía de superficie (en solución y absorción al sedimento transportado por las escorrentías), hacia el perfil de suelo y acuífero por filtración (en la solución). Las ecuaciones usadas para modelar el movimiento del pesticida en la fase de suelo del ciclo hidrológico fueron adoptadas de GLEAMS (Leonard et Al., 1987). El movimiento del pesticida es controlado por su solubilidad, degradación de media-vida y coeficiente de absorción de carbón orgánico en el suelo. El pesticida en el follaje de la planta y en el suelo se degrada de manera exponencial según la media-vida apropiada. El transporte del pesticida por agua y sedimento se calcula para cada acontecimiento escorrentía y se estima para cada capa de suelo cuando ocurre filtración.

PESTICIDAS

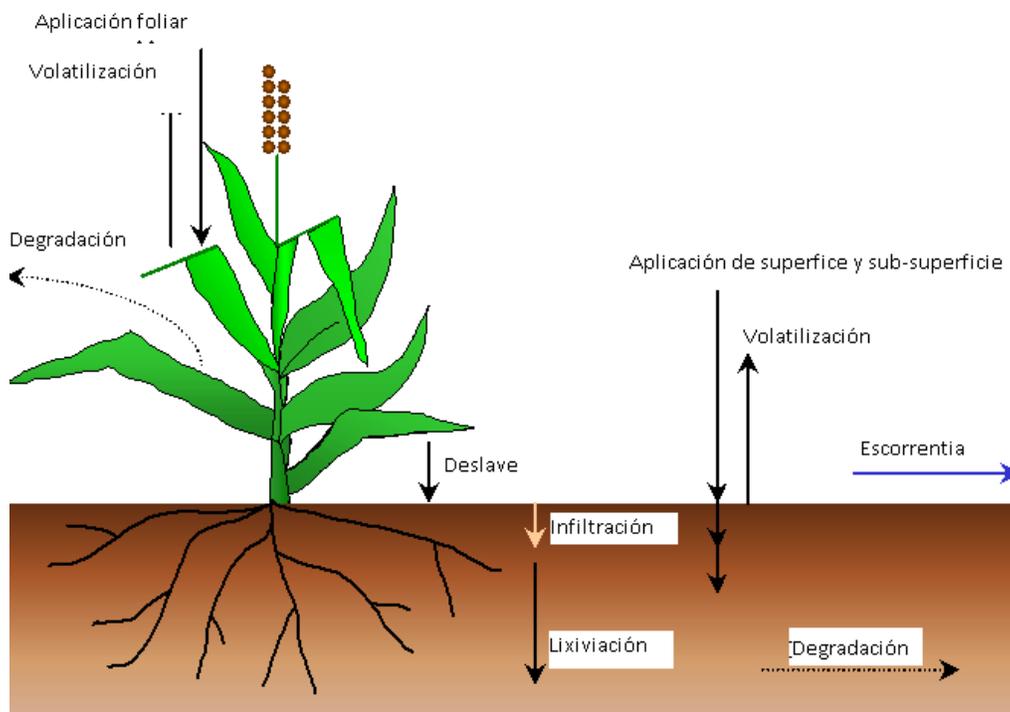


Figura 5. Destino del pesticida y transporte en SWAT

2.1.7 MANEJO

SWAT permite al usuario definir las prácticas de manejo que suceden en cada HRU. El usuario puede definir el principio y conclusión de la época de cultivo, especificando tiempo y cantidades de abono, aplicaciones de pesticida e irrigación, así como el tiempo de operación del cultivo. Al final de la época de cultivo, la biomasa puede ser removida del HRU como rendimiento o colocada en la superficie como residuo. Adicionalmente a estas prácticas básicas de gestión, las operaciones como aplicaciones automatizadas de abono y agua y la incorporación de cada opción concebible de gestión para el uso de agua están disponibles. Las últimas mejoras fueron para el manejo de suelos y la incorporación de rutinas para calcular las cargas de sedimento y alimento nutrientes de áreas urbanas.

ROTACIONES

Una rotación en SWAT se refiere a un cambio en las prácticas de manejo de un año al próximo. No hay límite al número de años de diferentes operaciones de gestión, especificado en una rotación. SWAT también no limita el número de cobertura/cosechas desarrolladas un año en el HRU. Sin embargo, sólo una cobertura de tierra puede desarrollarse en cada ocasión.

USO DEL AGUA

Los dos más típicos usos del agua son para la aplicación a terrenos o como el abastecimiento de agua de una ciudad. El SWAT permite que el agua para pueda ser aplicada en un HRU de cualquier fuente de agua de adentro o fuera de la cuenca. El agua puede también transferirse entre depósitos, alcances y sub-cuencas así como exportarla de la cuenca.

2.2 FASE DE ENRUTAMIENTO DEL CICLO HIDROLOGICO

Una vez que SWAT determina las cargas de agua, sedimento, nutrientes y pesticidas hacia el canal principal, las cargas son dirigidas por la red de corriente de la cuenca usando una estructura de orden semejante a la HYMO (William y Hann, 1972). Adicionalmente al seguimiento del flujo masivo en el canal, SWAT modela la transformación de sustancias químicas en la corriente y cauce. La figura 6 ilustra los diferentes procesos en-corriente modelados por SWAT.

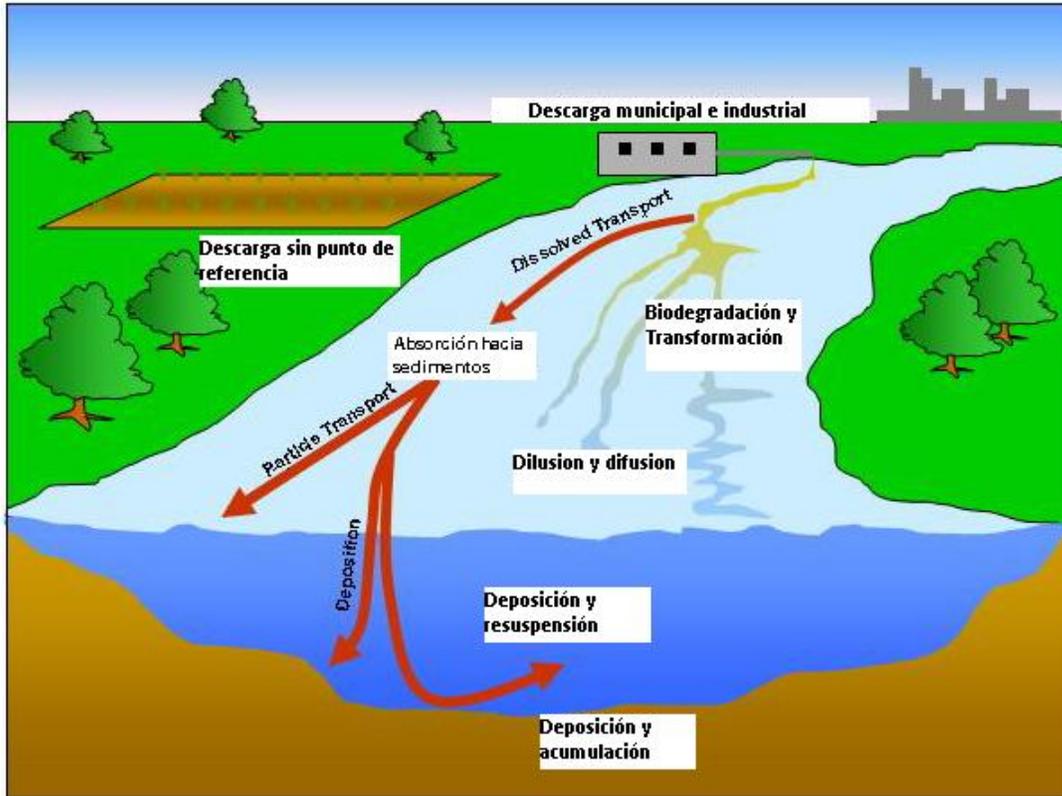


Figura 6. Procesos de corriente modelados por SWAT

2.2.1 ENRUTAMIENTO EN EL CANAL PRINCIPAL O ALCANCE

El enrutamiento en el canal principal puede ser dividido en cuatro componentes: agua, sedimento, nutrientes y sustancias químicas orgánicas.

ENRUTAMIENTO DE FLUJO

Cuando el agua fluye río abajo, una porción puede perderse debido a la evaporación y transmisión por la capa del canal. Otra pérdida potencial es la eliminación de agua del canal para el uso agrícola o humano. El flujo puede ser suplementado por la lluvia directamente en el canal y/o adicionado de agua de descargas del punto de la fuente. El flujo es dirigido por el canal que utiliza un método variable de coeficiente de almacenamiento desarrollado por William (1969) o el método de enrutamiento de Muskingum.

ENRUTAMIENTO DEL SEDIMENTO

El transporte del sedimento hacia el canal es controlado por la operación simultánea de dos procesos, deposición y degradación. Las versiones anteriores de SWAT usaron la fuerza de la

corriente para estimar deposición/degradación en los canales (Arnold et Al, 1995). Bagnold (1977), definiendo la fuerza de la corriente como el producto de la densidad de agua proporcionada del flujo y pendiente de la superficie del agua. William (1980) usó la definición de Bagnold de la fuerza de la corriente para desarrollar un método para determinar la degradación como una función de la pendiente del canal y velocidad. En esta versión de SWAT, las ecuaciones han sido simplificadas y la cantidad máxima de sedimento que puede ser transportado de un segmento de alcance es una función de la velocidad máxima del canal.

ENRUTAMIENTO DE NUTRIENTES

Las transformaciones del nutriente en la corriente son controladas por el componente de calidad de agua en-corriente del modelo. La cinética de la corriente usada en el SWAT para dirigir los nutrientes es adaptada de QUAL2E (Brown y Barnwell, 1987). El modelo rastrea nutrientes disueltos y absorbidos del sedimento. Los nutrientes disueltos son transportados con el agua mientras los absorbidos de los sedimentos se depositan con el sedimento en la capa del canal.

ENRUTAMIENTO DEL PESTICIDA AL CANAL

Mientras un número ilimitado de pesticidas puede ser aplicado a las HRUs, sólo un pesticida puede ser dirigido por la red de canales de la cuenca debido a la complejidad de los procesos simulados. Al igual que con los nutrientes, la carga total de pesticida en el canal es dividida en disueltos y componentes de sedimento-adheridos. Los mayores procesos en-corriente simulados por el modelo son asentamiento, entierro, re-suspensión, volatilización, difusión y transformación.

2.2.2 ENRUTAMIENTO EN LOS DEPOSITOS/RESERVAS

El equilibrio del agua para depósitos incluye afluencia, desagüe, lluvia en la superficie, evaporación, infiltración del fondo de depósito y diversidad.

DESAGUE DEL DEPÓSITO

El modelo ofrece tres alternativas para estimar el desagüe del depósito. La primera opción permite al usuario ingresar desagüe medido. La segunda opción, está diseñado para los pequeños y depósitos incontrolados, requiere que los usuarios especifiquen una proporción de la liberación de agua. Cuando el volumen del depósito excede el almacenamiento principal, el agua extra es evacuada en la proporción especificada. El volumen que excede el vertedero de emergencia es

evacuado en un día. La tercera opción, está diseñada para depósitos más grandes y manejados, pide al usuario especificar los volúmenes mensuales para el depósito.

ENRUTAMIENTO DEL SEDIMENTO

La afluencia del sedimento puede originarse del transporte a través de los alcances río arriba o de escorrentías de superficie dentro del sub-cuenca. La concentración de sedimento en el depósito es estimada utilizando una ecuación sencilla de continuidad basada en el volumen y la concentración de afluencia, desagüe, y del agua retenida en el depósito. El asentamiento del sedimento en el depósito es regido por una concentración de sedimento de equilibrio y la media del tamaño de la partícula del sedimento. La cantidad de sedimento en el desagüe de los depósitos, es el producto del volumen de fluidez del agua fuera del depósito y la concentración suspendida del sedimento en el depósito en el momento de la liberación.

NUTRIENTES EN DEPOSITOS/RESERVAS

Un modelo sencillo para el nitrógeno y equilibrio de la masa del fósforo fue tomado de Chapra (1997). El modelo asume: 1) el lago está completamente mezclado; 2) el fósforo es el alimento nutritivo restrictivo; y 3) fósforo total es una medida del estatus trófico del lago. La primera suposición ignora estratificación del lago e intensificación de fitoplancton en el epilimnion. La segunda suposición es generalmente válida cuando fuentes de no-punto dominan y la tercera suposición implica que una relación existe entre fósforo y biomasa total. La ecuación del equilibrio de la masa del fósforo incluye la concentración en el lago, afluencia, desagüe y la tasa general de pérdida.

PESTICIDAS EN EL DEPÓSITO

El modelo del equilibrio del pesticida del lago es tomado de Chapra (1997) y asume condiciones bien combinadas. El sistema es dividido en agua bien mezclada de superficie estratifica subyacente por una capa bien mezclada de sedimento. El pesticida se divide en disuelto y fases de partícula en las capas de agua y sedimento. Los mayores procesos simulados por el modelo son la carga, desagüe, transformación, volatilización, asentamiento, difusión, re-suspensión y entierro.

3. APLICACIÓN DEL MODELO SWAT

La extensión ArcSWAT ArcGIS es la interfaz gráfica de usuario para el modelo SWAT2005 (Soil and Water Assessment Tool) (Arnold et al., 1998), este es un paquete de análisis de datos geográficos diseñado para ayudar a generar archivos de entrada SWAT y analizar específicamente información resultante a partir de simulaciones usando las características principales de ArcGIS.

Con la interface usted puede:

- Crear archivos de Entrada directamente desde las tablas y mapas raster de ArcGIS.
- Correr el modelo SWAT2005 sin salir de la Interface
- Mostrar resultados de SWAT usando los diferentes documentos de ArcGIS como tablas, gráficos y mapas.

La interface SWAT fue creada como una extensión más de ArcGIS, esto quiere decir que es un programa independiente, permitiendo aprovechar las características disponibles en otras extensiones de ArcGIS.

Este documento describe de manera general cada una de las herramientas u opciones disponibles en Interface ArcSWAT en lo que se refiere a la producción de agua y sedimentos, las otras características serán mencionadas en menos detalle.

Este documento se diferencia del original por no tener la descripción paso a paso para la edición de las Bases de Datos de fertilizantes, pesticidas, manejo del crecimiento de la planta y Zona Urbana. No está incluida la sección *The Edit Input Menu* que describe la edición de datos de entrada una vez almacenados, ni tampoco se incluye los apéndices. Para más detalles puede leer la documentación que se encuentran en la página web de usuario de SWAT; los siguientes son enlaces a sitios de apoyo relacionados con SWAT usuario.

- Usuario del sitio Web de SWAT: <http://www.brc.tamus.edu/swat/>
- Foros de SWAT y los grupos de usuarios: <http://www.brc.tamus.edu/swat/userforums.html>
- ArcSWAT usuario del sitio web: <http://www.brc.tamus.edu/swat/ArcSWAT.html>
- ArcSWAT grupo de usuarios de Google: <http://groups.google.com/group/ArcSWAT>

El propósito de este documento es servir de guía para cursos específicos que permiten apoyarse en este tipo de herramientas para lograr sus objetivos.

3.1 PREPARANDO LOS DATOS DE ENTRADA

Para utilizar la interface es necesario acceder a los temas de cada mapa en ArcGIS y los archivos de base de datos, los cuales proveen información de diferentes tipos dentro de la cuenca. Los mapas necesarios y los archivos de base de datos deben estar listos para correr la interface. A continuación se describe los diferentes tipos de mapas y tablas necesarias para la entrada del modelo.

SECCION 3.1.1: TEMAS DE ARCSWAT REQUERIDOS

❖ GRID—Modelo Digital de Elevación (DEM)

La interface permite valores enteros o reales para las elevaciones del DEM. Las unidades usadas para definir la resolución y elevación del mapa no necesariamente deben ser iguales. La resolución del mapa debe estar definida en una de las siguientes unidades: metros, kilómetros, pies, yardas, millas, Grados decimales. La elevación debe ser definida en una de las siguientes unidades: metros, centímetros, yardas, pies, pulgadas. En caso de no poseer un DEM, se deben tener el tema de Curvas de Nivel con su respectiva altura en las unidades anteriormente mencionadas, para generar el modelo.

❖ GRID—Cobertura y Uso de la tierra

Las categorías especificadas en el Mapa de Uso y Cobertura de la Tierra necesitan ser reclasificadas dentro de los tipos que el SWAT maneja. El Usuario tiene dos opciones para reclasificar las categorías:

La segunda opción es digitar las cuatro letras del código interno de SWAT para cada categoría cuando el mapa de cobertura es cargado en la interface.

La tercera opción es crear una tabla que identifique las cuatro letras del código SWAT para las diferentes categorías de Uso y Cobertura de la tierra en el mapa. El formato de la tabla es descrita más adelante.

❖ GRID—Suelos

Las categorías especificadas en el Mapa de Suelos necesitan ser asociadas a la base de datos de suelos (La interface solo incluye datos de suelos de los Estados Unidos), para personalizar la base de datos de suelos diseñada, el Usuario tiene cuatro (4) opciones para asociar el mapa a la base de datos de suelos de la interface, se describe la opción "Name" que es la recomendada:

La opción "Name". El usuario importara loa archivos (.sol) o el tipo de dato de suelos a través de la base de datos de suelo para cada una de las categorías del mapa creadas en el proyecto. La Variable "Name" especificada para cada una de las categorías del mapa debe existir en la base de datos de suelos del Usuario y para reclasificar las categorías del Mapa, se debe crear una tabla de categorías que podrá ser cargada. En la Sección 3.3 se resume el formato de la tabla usada para especificar la información de los suelos.

SECCION 3.1.2: ARCHIVOS DE TEXTO Y TABLAS EN ARCGIS

❖ Tabla de Localización

La tabla de localización es utilizada para especificar la ubicación de: localizaciones de puntos para la recolección de información de lluvia, clima, temperatura o localización de estaciones meteorológicas. El uso de la tabla de localización para la ubicación de salidas o desembocaduras de la subcuenca es recomendado cuando el usuario pretende comparar datos observados o medidos con los resultados del SWAT.

Las Tablas de localización de aforos de lluvia y temperatura deberán ser creadas cuando los datos medidos serán usados en la simulación.

La Base de datos meteorológicos incluida con la interface tiene almacenadas 1112 estaciones alrededor de los U.S. Si la base de datos no será utilizada en la simulación, una tabla de localización es requerida para los datos de estaciones meteorológicas personales o de la región.

Los datos meteorológicos de la región diferentes a los de U.S. deberán ser introducidos a través de la interface en la base de datos de estaciones meteorológicas del usuario cuando se crea el proyecto.

Formato de la Tabla: Preferida (4 Campos)

Nombre	Formato	Descripción
ID	Entero	Número de identificación del Aforo
NAME	Texto Max 8 Caracteres	Corresponde al nombre de la Tabla*
XPR	Punto flotante	Coordenada X en la proyección definida
YPR	Punto flotante	Coordenada Y en la proyección definida
LAT	Punto flotante	Latitud en décimas degree
LONG	Punto flotante	Longitud en décimas degree

*El nombre de la tabla la cual tiene los datos de temperatura y precipitación (Ej: pcp.dbf).

❖ Atributos de Uso del Suelo (.dbf)

La tabla de atributo de uso de la tierra es utilizada para especificar el código del tipo de uso/planta o tipo de uso urbano para ser modelado para cada categoría en el mapa raster de Uso de la tierra. La primera fila de la tabla debe contener los nombres de los campos o atributos. Las filas siguientes tendrán los datos requeridos. Un ejemplo de esta tabla puede encontrarse en los datos incluidos con la interface.

Formato de la Tabla: Preferida (2 Campos)

Nombre	Formato	Descripción
VALUE	Entero	Numero de categoría del mapa
LANDUSE	Texto 4 Caracteres	Corresponde al código interno de la Base de datos de SWAT de Uso de la tierra

❖ **Atributos de Suelos (.dbf)**

El archivo de atributos de suelos especifica el tipo de suelo a ser modelado por cada categoría en el mapa raster de suelos. El formato del archivo cambiará dependiendo sobre la opción que se escoja para enlazar los datos de suelos al mapa. La primera fila de la tabla debe contener los nombres de los campos o atributos. Las filas siguientes tendrán los datos requeridos. Un ejemplo de esta tabla puede encontrarse en los datos incluidos con la interface.

Formato de la Tabla: Opción NAME (2 Campos)

Nombre	Formato	Descripción
VALUE	Texto	Numero de categoría del mapa
NAME	Texto 30 Caracteres máximo	Prefijo del nombre del archivo conteniendo datos de suelos para la categoría. Por Ejemplo, Si los datos de suelos para la categoría 1 están almacenados en branyon.sol, entonces "branyon" estaría introducida por NAME

❖ **Tabla de Datos de Precipitación (.dbf)**

La tabla de datos de Precipitación es utilizada para guardar la precipitación diaria para una estación meteorológica. Esta tabla es requerida si la opción *raingage* es seleccionada para la caída de lluvia en ventana de datos de clima. Existe una tabla de datos de precipitación para cada localización listada en la tabla de ubicación de medidas de lluvia. El nombre de la tabla de datos de precipitación es "*nombre.dbf*" donde *nombre* es el texto digitado como registro en el campo NAME en la tabla de localización de medidas de lluvia.

Formato de la Tabla: (2 Campos)

Nombre	Formato	Descripción
DATE	fecha	fecha del aforo
PCP	punto flotante (f5.1)	Cantidad de precipitación (mm)

❖ **Tabla de Datos de Temperatura (.dbf)**

La tabla de temperatura es utilizada para almacenar las temperaturas mínimas y máximas para registradas por una estación meteorológica. Esta tabla es requerida si se escoge la opción **climate stations** en la ventana de definición de datos de clima. Existirá un archivo de temperatura para cada tabla de localización de estaciones meteorológicas. El nombre de la tabla de datos de temperatura es "*nombre.dbf*" donde *nombre* son los caracteres introducidos para NAME en la tabla de localización de estaciones climáticas.

Formato de la Tabla: (3 Campos)

Nombre	Formato	Descripción
DATE	fecha	Fecha de medición
MAX	punto flotante (f5.1)	Temperatura máxima diaria (°C)
MIN	punto flotante (f5.1)	Temperatura mínima diaria (°C)

3.2 USANDO LA INTERFAZ ARCSWAT

Para cargar la Interface ArcSWAT desde ArcGIS

1. Ejecute el ArcMap para un nuevo proyecto
2. En el Menú **File**, presione **Extensions** (Figura 7)
3. Observe las extensiones disponibles hasta encontrar **Spatial Analyst, SWAT Project manager y SWAT Watershed Delineator**.
4. presione **OK**.

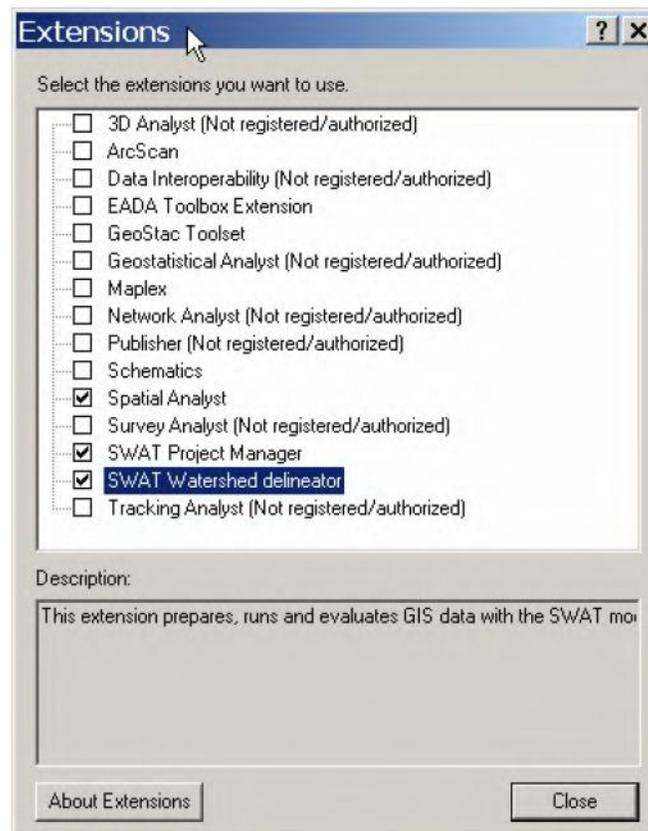


Figura 7: Menú para cargar extensiones en ArcGIS.

Luego en el menú del ArcGIS se selecciona Toolbars y se escoge la correspondiente a ARCSWAT; entonces esta aparecerá en la pantalla de ArcMap.



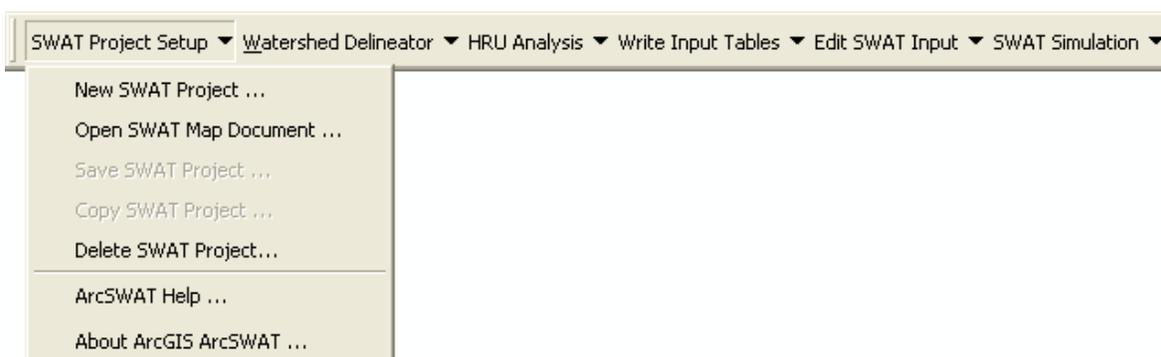
La barra de herramientas de la pantalla principal que contiene el menú de inicio ofrece al usuario 6 opciones: SWAT Project Setup, Watershed Delineator, HRU Analysis, Write Input Tables, Edit SWAT Input Menú y SWAT Simulation.

Los menús personalizados del ArcSWAT contienen los comandos necesarios para procesar los datos de la cuenca, generar archivos de entrada para SWAT, correr el modelo, y mostrar los resultados. La variedad de comandos en cada uno de los cinco (6) menús están listados de arriba hacia abajo y deben ser procesados en este orden en secuencia. Debido al número de diferentes pasos requeridos para procesar la información, la interface mantiene un registro del usuario y no permite que el usuario seleccione comandos hasta que los comandos prioritarios hayan sido ejecutados.

En las secciones siguientes se describe la funcionalidad de los diferentes menús disponible en la barra de herramientas ArcSWAT.

3.2.1 SWAT PROJECT SETUP

Este menú de Configuración contiene los elementos que controlan la configuración y gestión de los proyectos en ArcSWAT. Un proyecto en ArcSWAT consta de un directorio que contiene un documento de ArcMap, geodatabases, y un subdirectorio para el almacenamiento temporal de Información Geográfica, y archivos de entrada para SWAT 2005.



New SWAT Project: Este comando crea un nuevo proyecto de SWAT.

Open SWAT Map Document: Permite abrir un proyecto SWAT existente.

Save SWAT Project: Este guarda el proyecto que actualmente se está trabajando.

Copy SWAT Project: Copia todo el contenido del proyecto, para una nueva carpeta de proyecto.

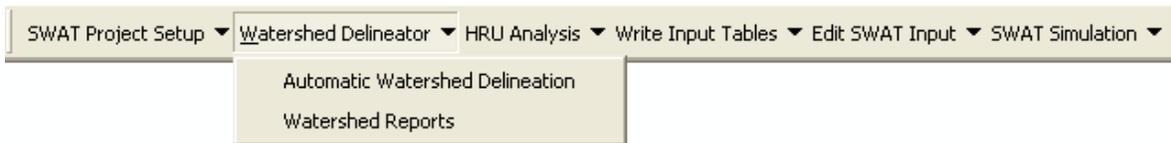
Delete Project: Elimina el proyecto ArcSWAT.

ArcSWAT Help: Este despliega el manual de usuario de ArcSWAT.

About ArcGIS ArcSWAT: Abre un cuadro que describe la versión de ArcSWAT utilizada.

3.2.2 WATERSHED DELINEATOR MENU

El menú delimitación de la cuenca el cual llamaremos watershed como aparece en la interface, contiene todos los comandos requeridos para importar y procesar los mapas y tablas en ArcGIS utilizados para el proyecto.



Cuando se crea un proyecto nuevo, el sistema automáticamente habilita el comando *Automatic Watershed Delineation*. Al hacer clic en este comando se abrirá el siguiente cuadro de diálogo (Figura 8).

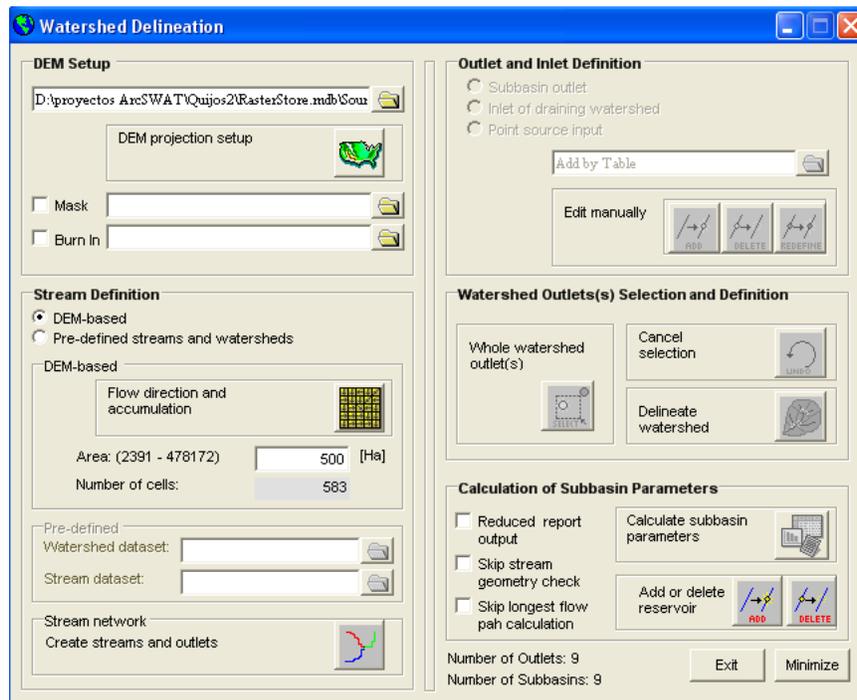


Figura 8: Ventana del contenido del menú de Delimitación de la Cuenca.

La ventana está dividida en cuatro (5) secciones: Información del DEM, Definición del flujo, Definición de subcuencas, Definición de Salidas, y Cálculos de parámetros de las subcuencas.

En la sección del DEM, existen cajas de texto para cargar tres (3) mapas diferentes como capas. La primera caja es utilizada para cargar el DEM utilizado para calcular todas las subcuencas y propiedades topográficas. La segunda caja es utilizada para cargar la máscara. La tercera es utilizada para cargar la red hídrica en formato shape.

Información del DEM

1. Para almacenar el DEM, presione  al lado de **DEM Setup**.
2. Otra ventana es desplegada la cual permite al usuario buscar el archivo que contiene el mapa (Figura 9). La ventana automáticamente aparece en el sitio o directorio que se definió en las variables del proyecto, así el usuario podrá localizar el nombre del mapa en la lista sin necesidad de moverse a otro directorio. Seleccione el nombre del mapa DEM.

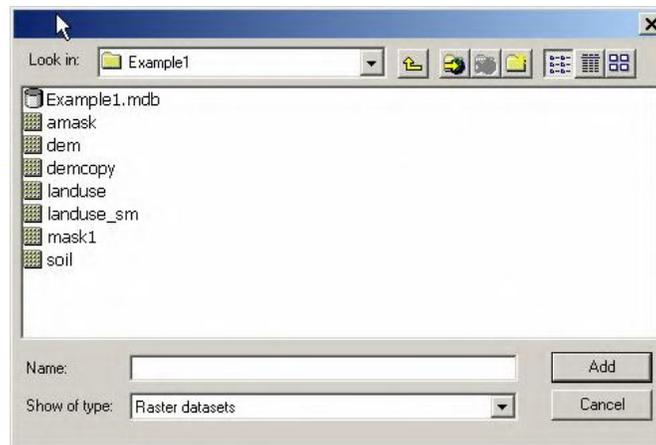


Figura 9: Ventana para búsqueda del DEM.

3. Presione **OK**. El mapa será desplegado en la pantalla.
4. La interface permite cargar una máscara para seleccionar una parte del DEM y un mapa en formato shape que define la red hídrica. Estos mapas son opcionales.

Definición del flujo

5. Una vez almacenados el DEM y cualquier mapa adicional necesarios para el procesamiento, presione el botón junto a *Flow direction and accumulation* (Figura 10). La interface procesara el DEM para eliminar los agujeros de desagüe.



Figura 10: Ventana para procesar el DEM y eliminar agujeros.

6. Una ventana avisara al usuario cuando el mapa se ha procesado completamente. Presione OK.
7. Active la caja de texto llamada *Área* y digite el área en hectáreas mínima que contendrá los drenajes requeridos para definir el comienzo de cada flujo. Entre más pequeño sea el número de hectáreas, mayor será el detalle en la delineación de la red de drenaje. Una vez digitado el número de hectáreas, presione el botón (Figura 11) al lado del texto *Create stream and outlets*.

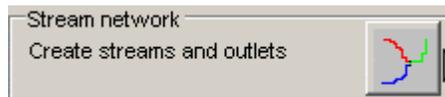


Figura 11: Ventana para crear dirección de flujo.

8. La red de drenaje y los puntos de unión entre flujos, son utilizados para definir las salidas de cada subcuencas, estos son mostrados sobre el mapa DEM (Figura 12). El usuario tiene varias opciones en este punto: 1) cambiar el área mínima y volver a ejecutar la rutina para la definición de flujos y salidas; 2) agregar puntos de salida importados de un archivo los cuales contienen las localizaciones exactas; 3) agregar puntos de salida manualmente, y 4) Borrar puntos de salida.

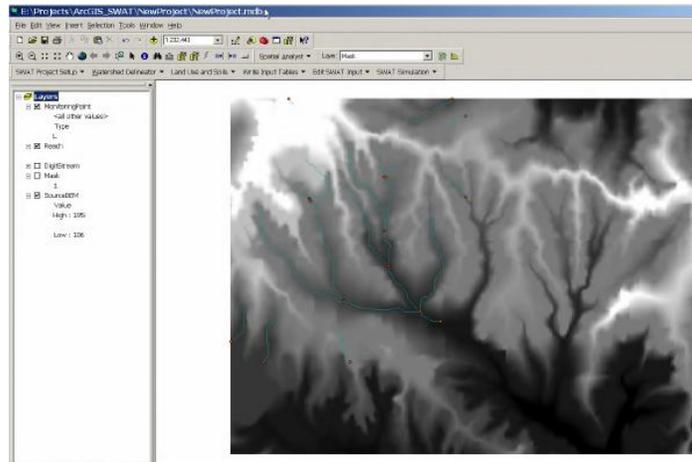


Figura 12: Red hídrica y puntos de unión entre flujos.

Definición de Subcuencas

9. En esta sección de la delineación de las cuencas hidrológicas, la configuración de las salidas que conformaran las subcuencas, puede ser refinado por el usuario. Los puntos de entradas y drenaje son posible agregarlos, eliminarlos o redefinirlos (Figura 13).

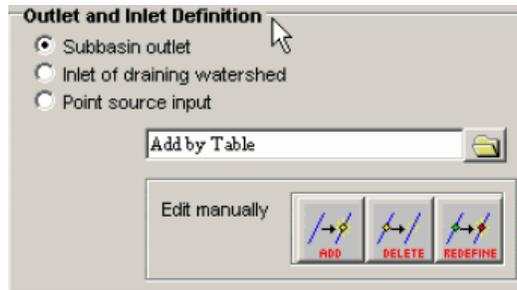


Figura 13: Puntos de salidas y entradas.

Cuando agregar y borrar puntos: **No inserte puntos sobre una misma celda.** Una vista más detallada de los puntos creados por la interface es mostrada en la Figura (a). Los puntos son colocados en la primera celda de cada brazo del río. Si estos puntos son eliminados y reemplazados con un punto en la celda (Figura b), La interface no será capaz de entender cual brazo o tributario del río es la línea de flujo correcta y estará inhabilitado para delinear las subcuencas propiamente para los dos flujos tributarios

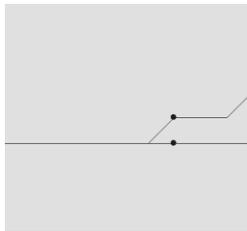


Figura a. puntos de conexión de flujos

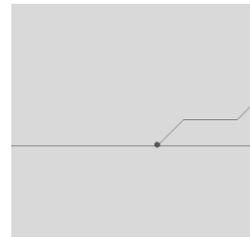


Figura b. puntos de salida en la misma celda

Definición de Salida o Cierre de la cuenca

10. Una vez el usuario ha terminado de editar los puntos de salida, debe escogerse el punto de salida para toda la cuenca. Presione sobre el botón  Select.

11. La ventana será minimizada y otra aparecerá (Figura 14). Usted puede escoger uno o más puntos de salida para las cuencas que usted desee modelar.

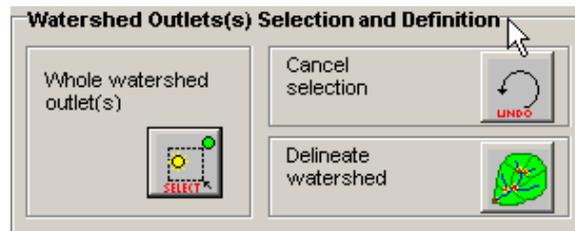


Figura 14. Ventana de selección de puntos de salida de toda la cuenca.

12. La interface permite seleccionar más de una salida. Esta característica permite simular cuencas adyacentes al mismo tiempo. Mínimo una salida debe ser seleccionada. Si existen múltiples salidas seleccionadas, cada una no debe ser escogida aguas arriba de las otras salidas.

- a. Para seleccionar una salida de la cuenca, coloque el puntero del mouse cerca del punto a escoger para ser la salida de la cuenca. Sostenga el botón izquierdo del mouse y muévelo en forma de cuadro sobre la pantalla alrededor de la salida a seleccionar. Suelte el botón del mouse.
- b. Para seleccionar varias salidas, sostenga la tecla shift continuamente mientras realiza la acción descrita en el paso anterior (a) cuantas veces sea necesario para seleccionar todas las salidas de cuenca de interés.

13. Una vez el punto o puntos son seleccionados. Presione OK sobre la ventana de selección de puntos de salida. Un mapa de cuencas aparecerá en la pantalla cuando la interface ha terminado la delimitación de la divisoria de aguas.

14. Si usted está en desacuerdo con la delineación y desea escoger una salida diferente, presione sobre el botón Undo  y repita los pasos del 12 al 13. De otra forma continúe con el siguiente paso.

15. Presione el sobre botón  Apply localizado al lado derecho. Una ventana aparecerá informando el que ha terminado el proceso de delimitación de cuencas y subcuencas y aparecerá el mapa con la configuración definida en los procesos anteriores (Figura 15).

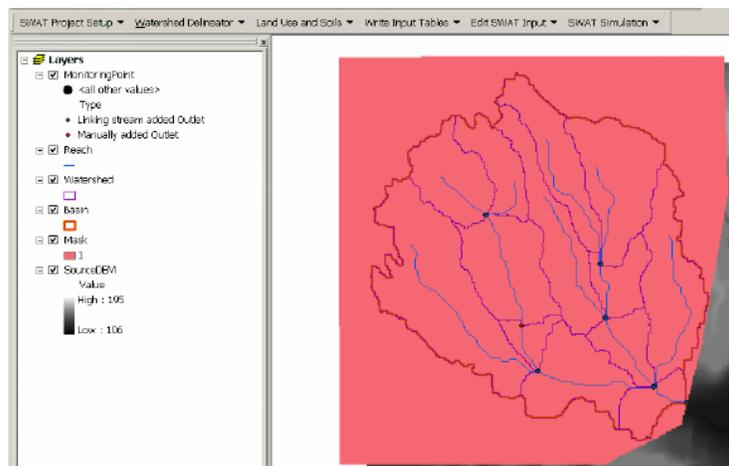


Figura 15. Delimitación y configuración de la cuenca.

Calculo de parámetros de las subcuencas

Esta sección contiene funciones para el cálculo de las características geomorfológicas de las subcuencas y para definir la ubicación de embalses en la cuenca (Figura 16).

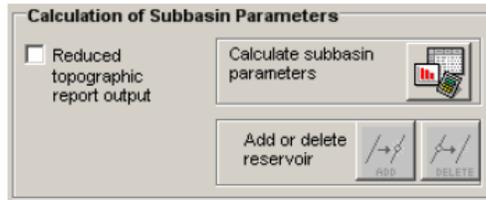
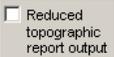


Figura 16. Menú para el cálculo de parámetros de las subcuencas.

16. Haga clic en el botón  para comenzar el cálculo de parámetros de las subcuencas. Esta función calcula los parámetros geomorfológicos para cada subcuenca y el tramo de río principal. Los resultados de los cálculos se almacenan en la tabla de atributos llamada *REACH*. (Véase Apéndice 1 del Manual SWAT: Base de datos del proyecto ArcSWAT - Datos Espaciales y descripción de las tablas de los datos almacenados). La interfaz puede tener una significativa cantidad de tiempo para completar esta operación, ya que requiere una gran cantidad de análisis. No es raro que para esta tarea requiera más de una hora cuando el número de subcuencas es mayor que 1000.

17. Opcional: El usuario puede reducir el proceso del cálculo de los parámetros estadísticos de las subcuencas, haciendo click . Esta opción acelera el cálculo de los parámetros de las subcuencas; elaborando solo los datos estadísticos y datos de elevación solo a nivel de cuenca.

18. Cuando se termina este proceso se puede acceder a ver el archivo texto de los parámetros de la configuración geomorfológica de la cuenca (Figura 17).

Elevation report for the watershed 1/1/0001 8:54:31 PM 11/20/2006 12:00:00 AM

Statistics:

Min. Elevation: 121
 Max. Elevation: 188
 Mean. Elevation: 132.066712452044
 Std. Deviation: 11.885930900061

Elevation	% Area Below Elevation	% Area watershed
121	.04	.04
122	.09	.04
123	.13	.04
124	.19	.06
125	.27	.08
126	.37	.11
127	.47	.11
128	1.31	.83
129	1.77	.46
130	2.39	.62
131	3.20	.9
132	4.08	.79
133	5.07	.99
134	6.16	1.09
135	7.46	1.3
136	8.52	1.05
137	9.86	1.35
138	11.41	1.55
139	12.85	1.44
140	14.86	2.01
141	16.38	1.72
142	18.06	2.38
143	21.57	2.61
144	24.04	2.47
145	26.89	2.85
146	29.79	2.9
147	33.72	3.26

Figura 17. Reporte de parámetros geomorfológicos de la cuenca.

3.2.3 HRU ANALYSIS MENU

El uso de la tierra, el suelo, y la caracterización de la pendiente para una cuenca se realiza utilizando los comandos del menú HRU Análisis en la Barra de ArcSWAT. Estas herramientas permiten a los usuarios cargar el uso del suelo y las capas del suelo en el proyecto actual, evaluar características de pendiente, y determinar las combinaciones y las distribuciones existentes entre el uso/suelo/pendiente para la delimitación de la cuenca y las subcuencas.



Mapas de Uso/Suelos/Pendiente

1. Sobre el menú *HRU Analysis*, presione *Land Use/Soil/Slope Definition*. La ventana de uso, suelos y pendiente será desplegada (Figura 18). Esta ventana se encuentra dividida en dos particiones, la sección para la capa de datos de Uso/Cobertura del suelo y la sección para la capa de datos de Suelos.

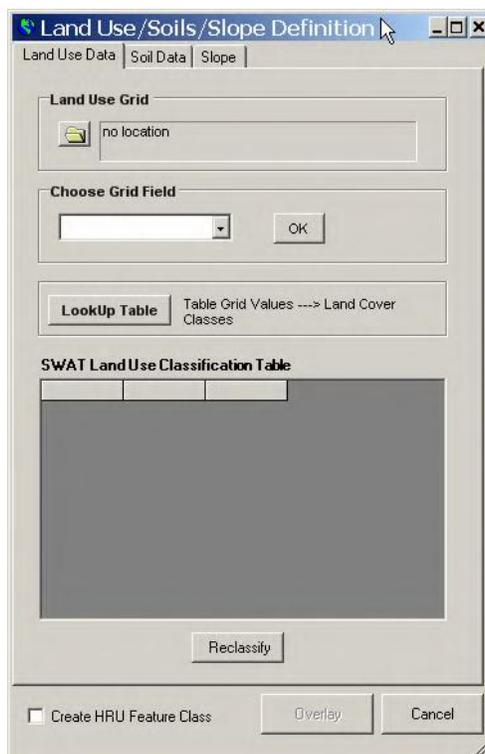


Figura 18. Ventana para datos de Uso/ Suelos/Pendiente.

2. En la sección del cuadro etiquetado con Land Use data layer, presione al lado de la caja de texto Land Use Grid.
3. Otra ventana es mostrada la cual le permite al usuario buscar el mapa de Uso y Cobertura del Suelo.
4. Presione sobre el nombre del mapa de Uso de suelo. El nombre se mostrara en la caja de texto nombrada Grid Field.
5. Presione OK. El mapa de Uso de suelo será desplegado en la pantalla.
6. La interface ArcSWAT necesita un código asignado a cada categoría en el mapa de Uso del suelo. El usuario podría importar una tabla o archivo de texto con esta información o el código puede ser digitado después de que el mapa es cargado. La interface incluye tablas que convierten los códigos de clasificación del Uso del suelo de la USGS a códigos SWAT. Si el mapa de uso es clasificado por un método alternativo, el usuario deberá crear una tabla conteniendo estos valores o introducirlos manualmente.
7. Presione sobre el botón al lado de LookUp Table. Una ventana aparecerá preguntando si carga la tabla por defecto de la USGS LULC o con una tabla alternativa de relación de códigos. Los códigos del SWAT serán desplegados al lado del mapa correspondiente al mapa de Uso y cobertura.
Para almacenar una tabla personalizada o un archivo de texto.
8. Una vez almacenados los códigos, el mapa está listo para ser reclasificado. Presione el botón Reclassify. El área del mapa que cae fuera de la cuenca es removida y el mapa queda reclasificado y ajustado a la resolución del mapa DEM.
9. Presione sobre la sección etiquetada como Soil Data y una ventana es desplegada la cual permite al usuario buscar el mapa de suelos. Seleccione el nombre del mapa. El nombre aparecerá junto a la caja de texto nombrada como Soils Grid. Presione OK. El mapa de suelos será desplegado en pantalla.
10. Para asociar el mapa de suelos a la base de datos de suelos, es necesario repetir los pasos 6, 7 y 8 mencionados anteriormente.
11. Presione sobre la sección etiquetada Slope y una ventana es desplegada la cual permite al usuario definir el numero de clases de pendientes a tener presente en el mapa. Presione OK. El mapa de pendiente será desplegado en pantalla.
12. Presione Overlay en la parte debajo de la ventana. Los mapas de Uso/ Suelo/Pendiente son cruzados y los registros para de cada pixel son combinados. Si desea obtener el mapa de Unidades de Respuesta Hidrológica obtenido del cruce de los tres mapas mencionados, se debe seleccionar el campo *Create HRU Feature Class* (Figura 19).

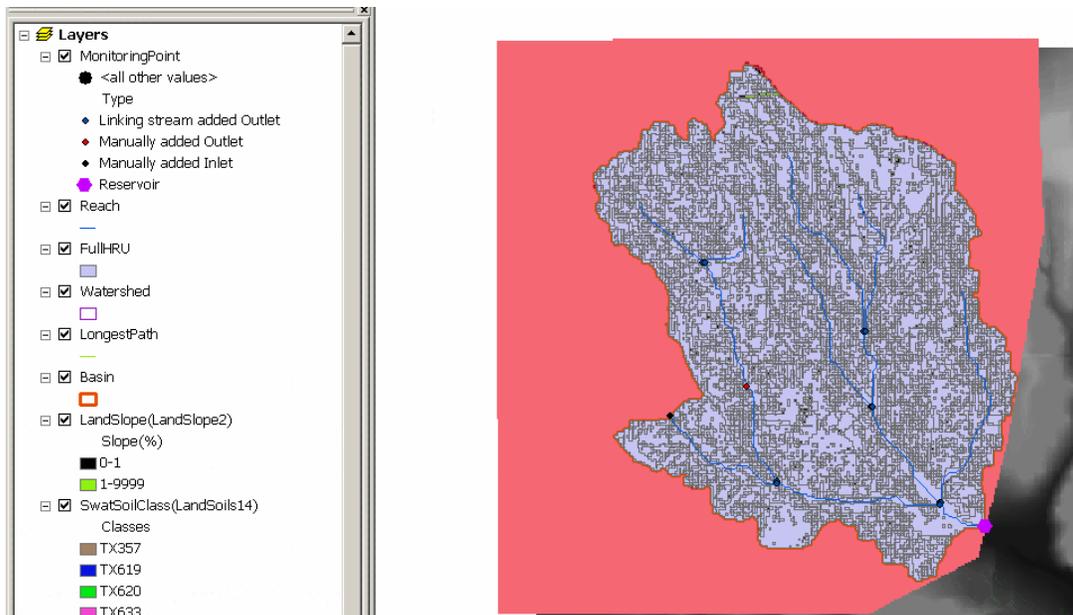


Figura 19. Mapa de Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU).

Distribución del Uso y los Suelos

1. Sobre el menú *HRU Analysis*, presione *HRU Definition*. Una ventana aparecerá (Figura 20) con la opción *Dominant Land Use, Soils, Slope* seleccionada. Si el usuario desea crear una sola HRU para cada subcuenca, se deja seleccionada esta opción.
2. Para crear múltiples HRUs con cada subcuenca, presione en el círculo al lado *Multiple Hydrologic Response Units*.
3. Precise la perceptibilidad de la interface para las combinaciones de Suelos, Uso y pendiente mediante el puntero del mouse sobre las dos escalas que aparecen en la ventana.

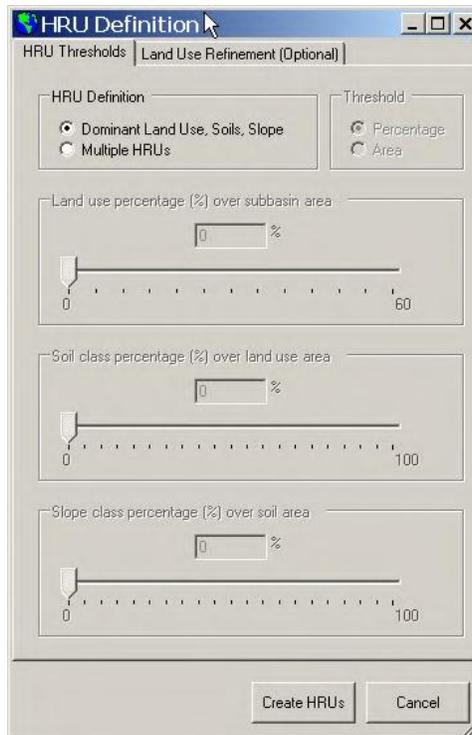


Figura 20. Ventana de distribución de Uso, Suelos y Pendiente.

Las escalas controlan el nivel mínimo utilizado para eliminar las cantidades de Uso, Suelos o Pendientes menores en cada subcuenca. Los Usos, Suelos o Pendientes que cubran un porcentaje del área de la subcuenca menor que el nivel mínimo digitado serán eliminados. Después del proceso de eliminación, el área restante de uso, suelos o pendiente es repartida, de esta manera el 100% del área de uso, suelo o pendiente en la subcuenca es modelada. Por ejemplo, asuma que existe una subcuenca que contiene:

30% Pastos
 21% Bosques
 35% Maíz
 10% Huertas, y
 4% Zona Urbana.

Si el nivel mínimo para el uso es del 20%, HRUs deberían ser creadas para pastos, Bosques y Maíz y las aéreas para ser modeladas se modificarían de la siguiente forma:

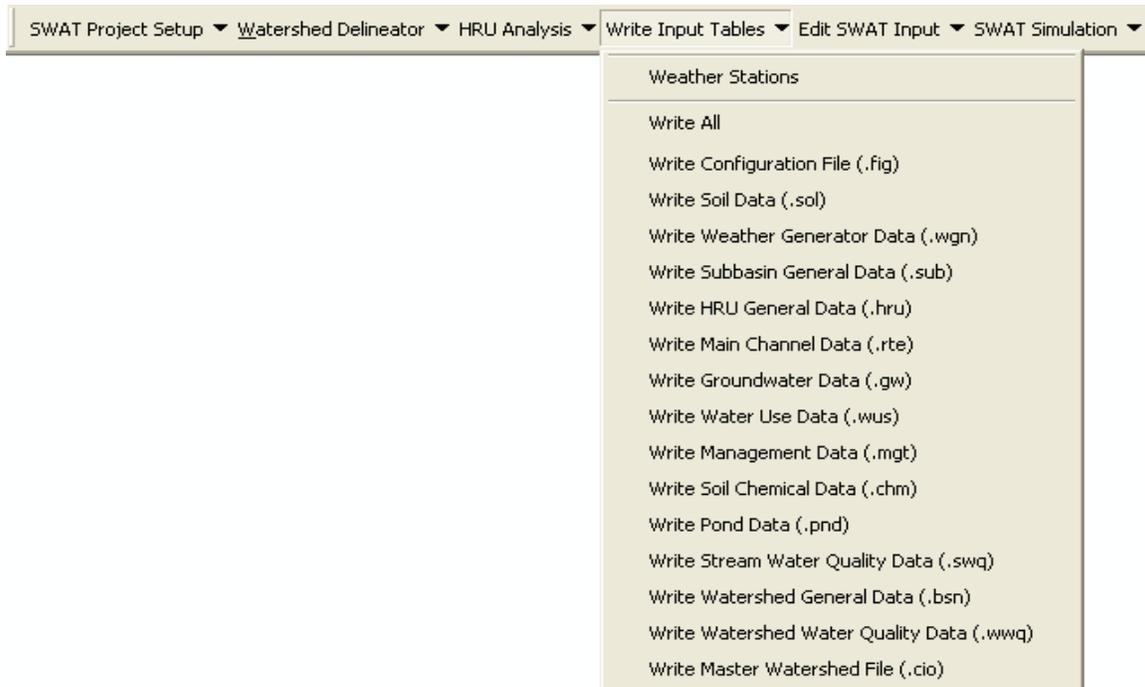
Pastos: $(30\% / 86\%) \times 100\% = 35\%$
 Bosque: $(21\% / 86\%) \times 100\% = 24\%$
 Maíz: $(35\% / 86\%) \times 100\% = 41\%$

Donde el 86% fue el % de área de la subcuenca originalmente cubierta por Pastos, Bosques y Maíz.

El nivel mínimo ajustado para múltiples HRUs está en función de las metas del proyecto y el aumento del detalle deseado para ser modelado.

4. Presione **Create HRUs**. La interface mostrara una ventana preguntando si desea ver el reporte de distribución una vez se ha generado las HRUs para la toda la Cuenca. Para ver el reporte, presione **Yes**. Si la distribución no es satisfactoria, repita los pasos del 1 al 4.

3.2.4 WRITE INPUT TABLES MENU



Para cargar los datos Meteorológicos

1. Sobre el menú *Write Input Tables*, presione **Weather Stations**. Una ventana aparecerá con seis (6) secciones: datos de precipitación (**Rainfall Data**), Datos de Temperatura (**Temperature Data**), Datos de Radiación solar (**Solar Radiation Data**), Datos de Velocidad del Viento (**Wind Speed Data**), Datos de Humedad Relativa (**Relative Humidity Data**) y datos para simular Clima (**Weather Generator Data**) (Figura 21). Para estos datos, el usuario debe especificar si los datos serán generados por el modelo o leídos desde archivos.

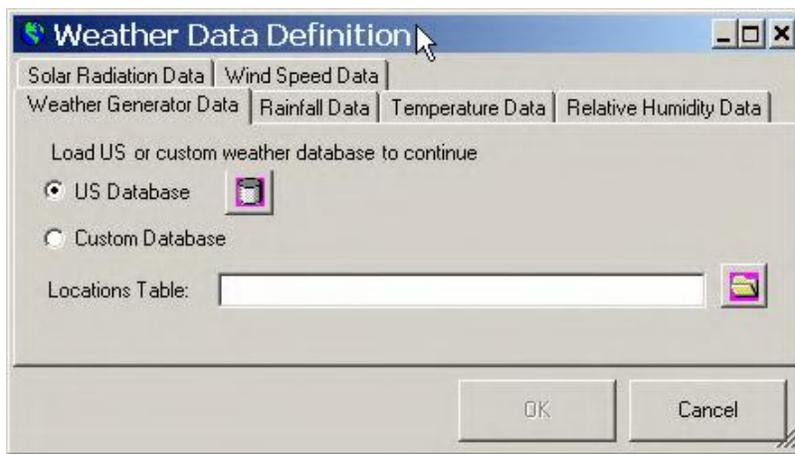
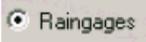


Figura 21. Ventana para datos Meteorológicos.

3. Para leer estos datos desde archivos creados con los datos reales de la zona. Presione en el círculo junto a **Raingages**  y una caja de texto aparecerá directamente debajo del botón, permitiendo buscar el archivo correspondiente. (Nota: La misma tabla no puede ser utilizada para Ingresar todos los parámetros climatológicos). Seleccione el nombre de la tabla de localización. El nombre de la tabla aparecerá junto a **File name**.
4. La sección **Weather Simulation Data** es utilizada por SWAT para generar clima, calculando radiación solar, velocidad del viento, humedad relativa, precipitación y temperatura; para cuando no existen mediciones o para llenar datos faltantes dentro de registros existentes. Una base de datos con información meteorológica de 1,112 estaciones alrededor de los US es suministrada con la interface y puede ser utilizada en la generación de clima. El Usuario también tiene la opción de utilizar datos personalizados para la generación de clima almacenados en la base de datos de estaciones meteorológicas del Usuario.
5. Presione **OK**. Las estaciones serán desplegadas en el mapa y la interface localizara las tablas en formato DBF conteniendo los datos de precipitación, temperatura, radiación, velocidad del viento y humedad relativa (Figura 22).

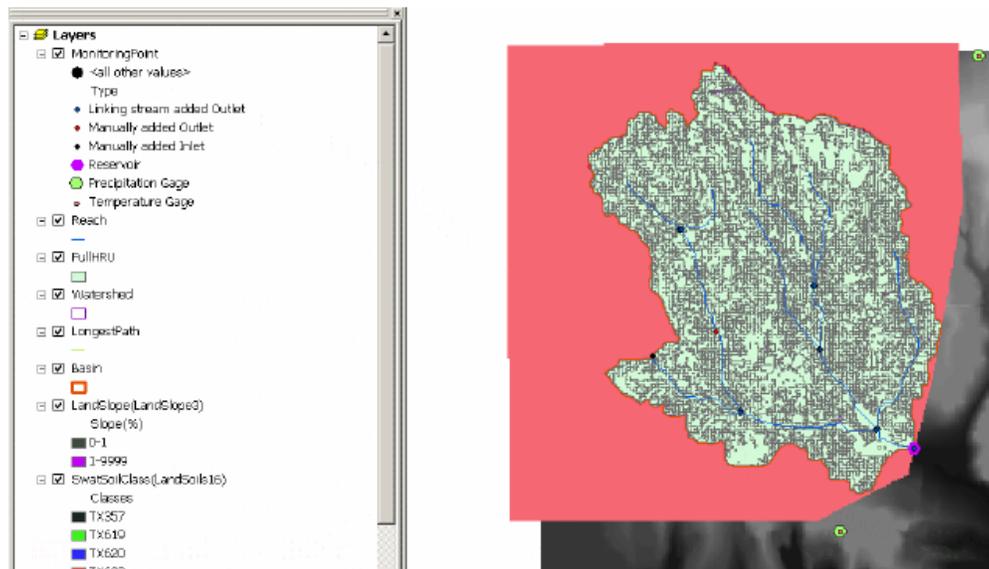


Figura 22. Mapa con las estaciones Meteorológicas.

Menú de entrada de datos (Input)

El menú **Input** construye archivos de la base de datos de ArcSWAT que contienen la información necesaria para generar los datos de entrada por defecto para el modelo del SWAT. Los comandos del menú Input necesitan ser procesados solamente una vez por proyecto. Sin embargo, si el usuario

modifica la distribución de las HRUs después de construir la base de datos de entrada, los comandos del menú Input deben ser procesados de nuevo. Para generar datos de entrada en ArcSWAT hay dos opciones:

- Ejecute el primer comando, **Write All**, sobre el menú Input
- Ejecute cada uno de los comandos del menú Input debajo de Write All.

Obviamente, la primera opción es más eficiente. Los comandos individuales son incluidos en el menú para efectos de chequeo y seguimiento de los procesos.

1. En el menú **Input**, presione **Write All**.
2. Una ventana aparecerá preguntando si desea correr todos los comandos a la vez. Presione **Yes**.
3. Una ventana aparecerá mostrando las diferentes bases de datos que están siendo generadas. Cuando la interface complete la base de datos, una marca aparecerá junto al nombre de la base de datos y producirá un sonido.
4. Cuando se empieza a construir la base de datos de manejo de cultivos, una ventana aparecerá ofreciendo dos (2) opciones para definir las unidades térmicas para el crecimiento de la planta (Figura 23). Solamente puede escoger **Yes** si las cuencas pertenecen a los Estados Unidos. Si el usuario presiona **Yes**, las unidades térmicas de la planta serán localizadas desde los parámetros locales climáticos almacenados en una base de datos interna. Si el usuario presiona **No**, otra ventana aparecerá pidiendo el valor de la unidad térmica. El valor de la unidad térmica por defecto será utilizado para todas las coberturas/plantas dentro de la cuenca.

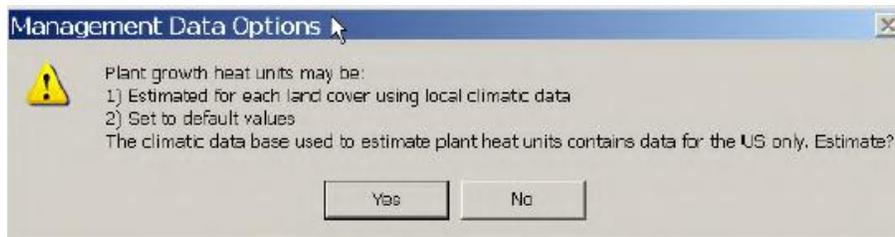
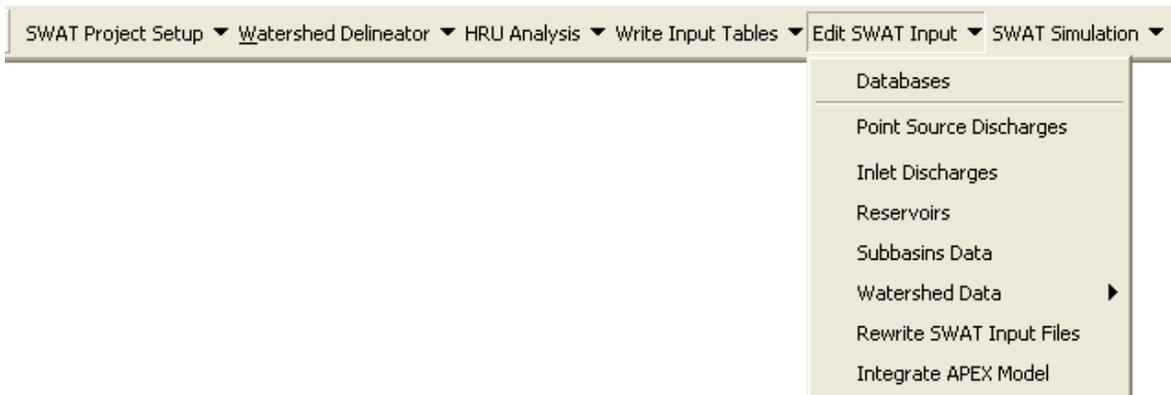


Figura 23. Ventana para asignar el valor por defecto de la unidad térmica del crecimiento de plantas.

5. Cuando todas las bases de datos son construidas, Una ventana será desplegada. Presione **OK** para continuar. En este momento todas las entradas han sido generadas y el usuario puede desplazarse al menú de Simulación (**SWAT Simulation**) y ejecutar el modelo o usar el editor de datos de entrada localizado en el menú **Edit SWAT Inputs**.

3.2.5 EDIT SWAT INPUT MENU

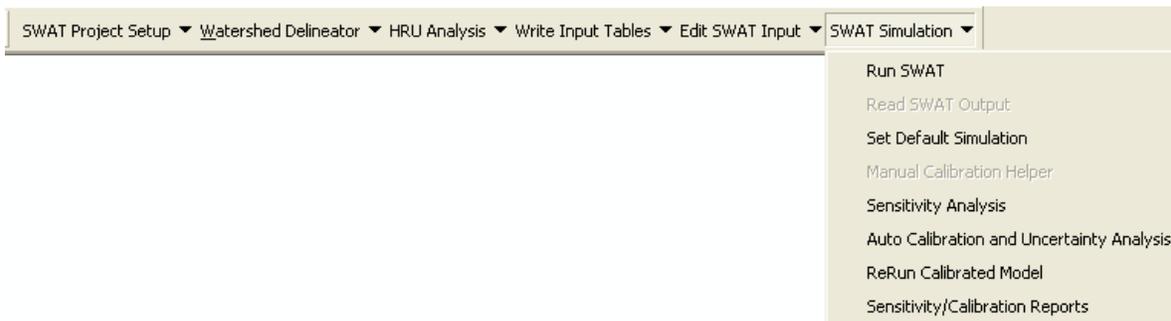
El menú *Edit SWAT Input* le permite al usuario editar las bases de datos del modelo SWAT y las bases de datos de los archivos que contienen las entradas del flujo de caudal para el modelo. Seleccione el menú Editar SWAT de entrada con el ratón. Seis puntos que permiten cambiar los datos de entrada, son listados en el menú Edición de entrada.



Si las tablas de entrada son modificadas, es necesario que sean almacenados estos cambios, para lo cual es necesario ejecutar en el menú *Rewrite SWAT Input Files*.

3.2.6 SWAT SIMULATION MENU

El menú *SWAT Simulation* le permite ajustar y ejecutar el modelo SWAT, desplegar los resultados, realizar análisis de sensibilidad y realizar la auto-calibración.



Ejecutar la Simulación - Run SWAT

Una vez todos los datos han sido creados y/o editados, El comando *Run SWAT* es utilizado para construir los archivos de entrada y ejecutar el modelo SWAT.

1. Sobre el menú *SWAT Simulation*, presione Run SWAT. Una ventana será desplegada (Figura 24).

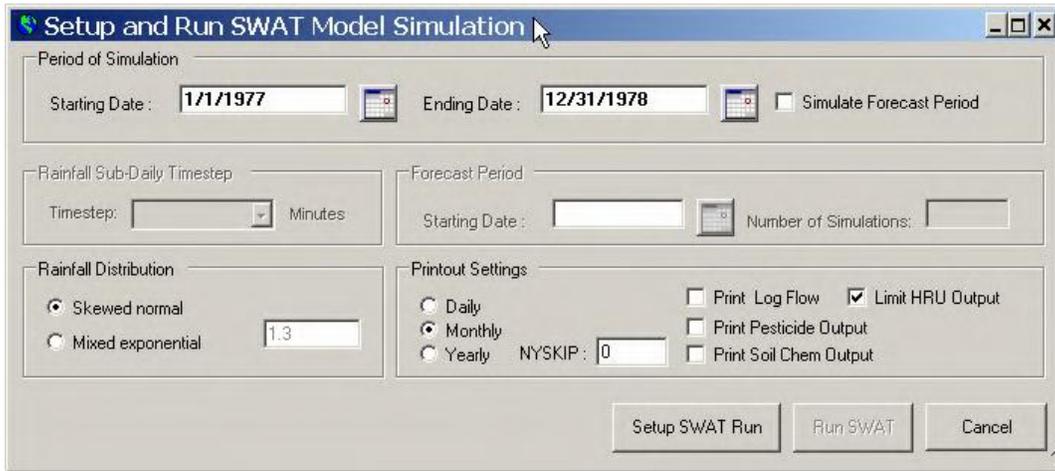


Figura 24. Ventana para ejecutar la Simulación con el modelo de SWAT

2. Cuando la ventana de Simulación aparece, las fechas de inicio y terminación de los registros de datos climatológicos ingresados al modelo, serán mostrados en las cajas etiquetadas como **Starting Date y Ending Date**. Si la precipitación y la temperatura han sido generadas por la interface, estos campos estarán en blanco. Si los datos de inicio y terminación necesitan ser ajustados o cambiados, Presione en la flecha de la caja donde aparece la fecha para ver la lista de días. Localice la fecha correcta y presione sobre ella.

3. Escoja el método de distribución de la lluvia (Ver manual SWAT2005) **Normal o Exponencial**, que será utilizado en la simulación, la periodicidad de la simulación (diaria, mensual o anual), opciones de impresión para los pesticidas y calidad del agua de los afluentes y las opciones deseadas para la degradación del canal.

4. Después de ajustar todos los parámetros, presione sobre el botón **Setup SWAT Run** en la ventana de Simulación; para construir los archivos de entrada CIO, COD, PCP.PCP y TMP.TMP

5. Después de construir todos los archivos de entrada, presione **Run SWAT**. Esta opción llamara la rutina que ejecuta la simulación SWAT.

6. Cuando la simulación se termina, un mensaje aparecerá indicando que la simulación ha terminado. Presione **OK** (Figura 25).



Figura 25. Mensaje para indicar que la simulación ha terminado.

Para mostrar los resultados

El segundo comando en el menú de simulación de proporciona herramientas para importar los archivos de textos de salida generados por SWAT en una base de datos Access. Tener los datos de salida del modelo SWAT en un formato de tabla de base de datos proporciona un formato conveniente para la extracción de la producción de interés

1. Sobre el menú, presione el comando **Read Results Output** es utilizado para mostrar las salidas o resultados de la simulación. La ventana de resultados será desplegada (Figura 26).

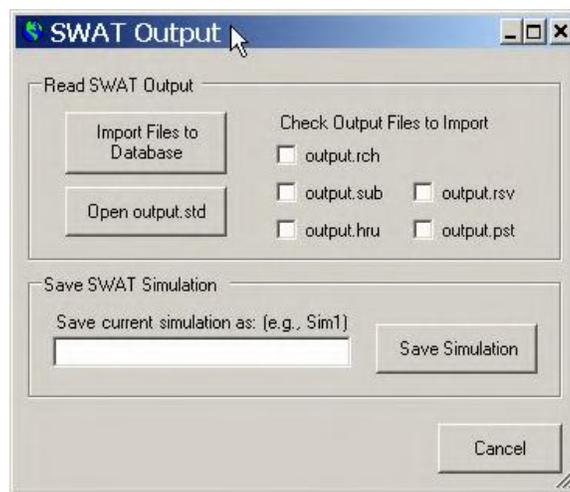


Figura 26. Ventana para leer resultados.

2. La venta de Resultados permite abrir el archivo llamado "output.std" el cual contiene el resumen de la información de los resultados de la modelación hidrológica del modelo, incluidas las estadísticas a nivel de cuenca que ayudan al usuario a determinar si el modelo SWAT está produciendo resultados válidos. Para abrir el archivo de salida "output.std" en un editor de texto, haga clic en el botón Abrir output.std. El archivo output.std aparecerá en un editor de texto (Figura 27).

output.std - Notepad

File Edit Format View Help

```

1
SWAT Sept '05 VERSION2005
General Input/output section (file.cio):
1/23/2008 12:00:00 AMARCGIS-SWAT Interface AV
Number of years in run: 2
Area of watershed: 419.170 km2
1
SWAT Sept '05 VERSION2005
General Input/output section (file.cio):
1/23/2008 12:00:00 AMARCGIS-SWAT Interface AV
Annual Summary for watershed in year 1 of simulation
UNIT TIME PREC SURQ LATQ GWQ PERCO TILE Q SW ET PET WATER YIELD SED YIELD NO3 SURQ NO3 LATQ NO3 PERC NO3 CROP N ORGANIC P SOLUBLE ORGANIC
(mm) (t/ha) (t/ha) (kg nutrient/ha)
1 31.18 0.20 0.02 0.00 0.00 0.00 129.18 19.35 66.68 0.20 0.02 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.02 0.00 0.00
2 84.19 12.02 0.15 0.00 0.00 0.00 166.50 34.21 77.04 11.97 1.06 0.06 0.02 0.00 0.00 1.45 0.00 0.18
3 83.23 9.40 0.18 0.13 0.95 0.00 188.00 51.73 121.66 9.57 0.95 0.03 0.01 0.21 0.00 1.22 0.00 0.15
4 62.53 4.79 0.11 0.80 1.64 0.00 186.97 58.36 164.94 5.57 0.39 0.01 0.00 0.38 11.23 0.51 0.00 0.06
5 64.23 12.59 0.13 0.99 1.23 0.00 156.06 83.88 199.56 13.61 0.07 0.03 0.00 0.14 45.98 0.11 0.00 0.01
6 93.51 9.86 0.17 1.24 1.58 0.00 101.32 138.85 237.24 11.11 0.00 0.02 0.00 0.09 6.67 0.01 0.00 0.00
7 90.14 0.87 0.14 0.71 0.00 0.00 45.84 146.63 237.44 1.66 0.00 0.00 0.00 0.00 0.85 0.00 0.00 0.00
8 61.69 0.16 0.12 0.25 0.00 0.00 20.14 90.03 237.68 0.51 0.00 0.00 0.00 0.00 0.75 0.00 0.00 0.00
9 78.39 3.10 0.17 0.09 0.00 0.00 27.84 69.07 209.56 3.31 0.00 0.01 0.00 0.00 0.69 0.00 0.00 0.00
10 40.69 0.05 0.09 0.04 0.00 0.00 31.34 38.76 164.48 0.17 0.00 0.00 0.00 0.00 0.01 0.00 0.00 0.00
11 125.39 5.22 0.26 0.01 0.00 0.00 107.83 42.09 100.07 5.27 0.00 0.05 0.01 0.00 0.00 0.01 0.00 0.00
12 125.10 12.91 0.24 0.12 2.90 0.00 189.36 25.92 54.88 13.02 0.02 0.13 0.01 0.21 0.00 0.05 0.01 0.01
1977 940.27 71.18 1.77 4.37 8.30 0.00 189.36 798.891871.23 75.97 2.52 0.34 0.06 1.04 66.17 3.40 0.02 0.42
1
SWAT Sept '05 VERSION2005
General Input/output section (file.cio):
1/23/2008 12:00:00 AMARCGIS-SWAT Interface AV
Annual Summary for watershed in year 2 of simulation
UNIT TIME PREC SURQ LATQ GWQ PERCO TILE Q SW ET PET WATER YIELD SED YIELD NO3 SURQ NO3 LATQ NO3 PERC NO3 CROP N ORGANIC P SOLUBLE ORGANIC
(mm) (t/ha) (t/ha) (kg nutrient/ha)
1 116.23 33.05 0.34 3.48 18.46 0.00 216.18 36.77 67.52 36.58 0.19 0.26 0.01 3.85 0.00 0.34 0.02 0.04
2 57.11 24.00 0.13 9.27 12.49 0.00 212.44 24.83 69.39 33.28 0.11 0.27 0.01 2.44 1.07 0.21 0.02 0.03
3 68.00 22.22 0.08 10.37 4.15 0.00 208.12 46.61 193.01 32.60 0.72 0.21 0.00 0.23 3.71 1.08 0.01 0.14
4 178.51 88.12 0.24 8.91 18.29 0.00 208.51 70.14 185.21 97.11 2.27 0.32 0.00 1.70 13.07 3.28 0.03 0.41
5 56.11 14.77 0.11 9.60 0.24 0.00 166.60 85.91 199.93 24.40 0.05 0.04 0.00 0.00 5.50 0.08 0.01 0.01
6 126.58 39.56 0.20 6.46 5.45 0.00 139.84 109.09 222.26 46.04 0.20 0.09 0.00 0.00 1.96 0.31 0.01 0.04
7 111.84 20.04 0.18 4.33 1.30 0.00 106.64 124.98 245.61 24.47 0.03 0.04 0.00 0.00 1.62 0.04 0.00 0.01
8 31.88 0.26 0.08 1.51 0.00 0.00 51.17 90.71 253.50 1.84 0.00 0.00 0.00 0.00 0.72 0.00 0.00 0.00
9 83.03 8.29 0.11 0.51 0.00 0.00 77.34 50.38 215.82 8.86 0.00 0.02 0.00 0.00 0.03 0.01 0.01 0.00
10 33.42 0.57 0.11 0.21 0.00 0.00 75.50 36.50 157.62 0.97 0.00 0.00 0.00 0.00 0.00 0.01 0.00 0.00
11 79.10 4.48 0.15 0.15 0.60 0.00 110.36 38.93 115.92 4.67 0.04 0.07 0.00 0.00 0.00 0.06 0.00 0.01
12 121.07 26.01 0.22 0.54 3.85 0.00 172.77 26.68 60.29 26.62 0.55 0.08 0.01 0.04 0.00 0.80 0.01 0.10
19781062.88 281.38 1.93 55.33 64.83 0.00 172.77 741.521986.08 337.35 4.16 1.39 0.04 8.27 27.69 6.23 0.11 0.78
1

```

Figura 27. Resultados del modelo en formato texto.

En la base de datos de salidas del modelo, quedan guardados otros archivos de salida que son de utilidad para hacer los análisis pertinentes de la modelación. A continuación se describen de manera general estos.

Menú de reportes

Distribución HRU: Despliega el reporte de distribución de Unidades de respuesta hidrológica.

Archivo FIG: Despliega el archivo de configuración (.fig) de la cuenca

Archivo BSN: Despliega el archivo de salida conteniendo los datos de la cuenca (.bsn)

Archivo CIO: Despliega el archivo de entrada y salida conteniendo los datos de control (file.cio)

Archivo PSO: Despliega el archivo de salida conteniendo los datos de pesticidas

Archivo WQO: Despliega el archivo de salida conteniendo los datos de calidad del agua

Tabla SBS: Despliega una tabla en formato DBF conteniendo los resultados del archivo de salida (.sbs) de cada HRU. Esta tabla es generada solamente cuando la periodicidad es ajustada anualmente (**Yearly**) (el archivo de HRU es generado todo para cada periodo, pero solamente es importado cuando el periodo es anualmente).

REFERENCIAS

- Arnold, J.G., P.M. Allen, and G. Bernhardt. 1993. A comprehensive surfacegroundwater flow model. *J. Hydrol.* 142:47-69.
- Arnold, J.G., J.R. Williams, A.D. Nicks, and N.B. Sammons. 1990. SWRRB: A basin scale simulation model for soil and water resources management. Texas A&M Univ. Press, College Station, TX.
- Arnold, J.G., J.R. Williams and D.R. Maidment. 1995. Continuous-time water and sediment-routing model for large basins. *Journal of Hydraulic Engineering* 121(2):171-183.
- Bagnold, R.A. 1977. Bedload transport in natural rivers. *Water Resources Res.* 13(2):303-312.
- Brown, L.C. and T.O. Barnwell, Jr. 1987. The enhanced water quality models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS documentation and user manual. EPA document EPA/600/3-87/007. USEPA, Athens, GA.
- Chapra, S.C. 1997. Surface water-quality modeling. McGraw-Hill, Boston.
- Green, W.H. and G.A. Ampt. 1911. Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Sciences* 4:11-24.
- Hargreaves, G.L., G.H. Hargreaves, and J.P. Riley. 1985. Agricultural benefits for Senegal River Basin. *J. Irrig. and Drain. Engr.* 111(2):113-124.
- Jones, C.A. 1983. A survey of the variability in tissue nitrogen and phosphorus concentrations in maize and grain sorghum. *Field Crops Res.* 6:133-147.
- Knisel, W.G. 1980. CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. USDA Conservation Research Rept. No. 26.
- Leonard, R.A. and R.D. Wauchope. 1980. Chapter 5: The pesticide submodel. p. 88-112. *In* Knisel, W.G. (ed). CREAMS: A field-scale model for chemicals, runoff, and erosion from agricultural management systems. U.S. Department of Agriculture, Conservation research report no. 26.
- Leonard, R.A., W.G. Knisel, and D.A. Still. 1987. GLEAMS: Groundwater loading effects on agricultural management systems. *Trans. ASAE* 30(5):1403-1428.
- McElroy, A.D., S.Y. Chiu, J.W. Nebgen, A. Aleti, and F.W. Bennett. 1976. Loading functions for assessment of water pollution from nonpoint sources. EPA document EPA 600/2-76-151. USEPA, Athens, GA.
- Monteith, J.L. 1965. Evaporation and the environment. p. 205-234. *In* The state and movement of water in living organisms. 19th Symposia of the Society for Experimental Biology. Cambridge Univ. Press, London, U.K.
- Nicks, A.D. 1974. Stochastic generation of the occurrence, pattern and location of maximum amount of daily rainfall. p. 154-171. *In* Proc. Symp. Statistical Hydrology, Tucson, AZ. Aug.-Sept. 1971. USDA Misc. Publ. 1275. U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.

- Priestley, C.H.B. and R.J. Taylor. 1972. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. *Mon. Weather Rev.* 100:81- 92.
- Ritchie, J.T. 1972. A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. *Water Resour. Res.* 8:1204-1213.
- USDA Soil Conservation Service. 1983. *National Engineering Handbook Section 4 Hydrology, Chapter 19.*
- USDA Soil Conservation Service. 1972. *National Engineering Handbook Section 4 Hydrology, Chapters 4-10.*
- Williams, J.R. 1980. SPNM, a model for predicting sediment, phosphorus, and nitrogen yields from agricultural basins. *Water Resour. Bull.* 16(5):843- 848.
- Williams, J.R. 1975. Sediment routing for agricultural watersheds. *Water Resour. Bull.* 11(5):965-974.
- Williams, J.R. 1969. Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. *Trans. ASAE* 12(1):100-103.
- Williams, J.R., A.D. Nicks, and J.G. Arnold. 1985. Simulator for water resources in rural basins. *Journal of Hydraulic Engineering* 111(6): 970-986.
- Williams, J.R. and R.W. Hann. 1978. Optimal operation of large agricultural watersheds with water quality constraints. Texas Water Resources Institute, Texas A&M Univ., Tech. Rept. No. 96.
- Williams, J.R. and R.W. Hann. 1972. HYMO, a problem-oriented computer language for building hydrologic models. *Water Resour. Res.* 8(1):79-85.
- Williams, J.R., C.A. Jones and P.T. Dyke. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASAE* 27(1):129-144.
- Wischmeier, W.H., and D.D. Smith. 1978. Predicting rainfall losses: A guide to conservation planning. USDA Agricultural Handbook No. 537. U.S. Gov. Print. Office, Washington, D. C.