

TUTORIAL SWAT-MODFLOW

*Documentación para la preparación del acoplamiento
SWAT-MODFLOW*

Octubre de 2015

Preparado por:
Ryan T. Bailey
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Universidad del Estado de Colorado
rtbailey@engr.colostate.edu



En asocio:



Traducido por: MSc. Ing. Cristian Guevara Ochoa



TUTORIAL SWAT-MODFLOW

Documentación para la preparación de las simulaciones del modelo.

PERSPECTIVA DEL TUTORIAL

En este tutorial se explica el procedimiento básico para la vinculación entre el modelo SWAT y el modelo MODFLOW, para proporcionar un modelo hidrológico acoplado superficial-subterráneo. Se discute la teoría y los procedimientos del acoplamiento de los dos modelos, seguido de un proceso paso a paso del procedimiento de vinculación dentro del contexto de un ejemplo de cuenca. Los archivos necesarios para la vinculación de los dos modelos y ejecución del modelo acoplado acompañan a este documento. Estos archivos incluyen archivos shapefile y rasters ArcGIS, Archivos de entrada del modelo SWAT, y archivos de entrada del modelo MODFLOW. Esta documentación puede ayudar con la creación de un modelo acoplado SWAT-MODFLOW para una cuenca determinada.

Este documento asume que los modelos SWAT y MODFLOW han sido construidos para el área de estudio.

CONTENIDO DEL TUTORIAL

1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCEDIMIENTO DE ACOPLAMIENTO
2. CREACIÓN DEL ACOPLAMIENTO ENTRE SWAT-MODFLOW
3. EJECUCIÓN DE LA SIMULACION DEL ACOPLAMIENTO ENTRE SWAT-MODFLOW
4. CALIDAD DEL AGUA USANDO SWAT-MODFLOW-RT3D*

Esta parte del código de modelado está siendo probado, y por lo tanto actualmente no es parte de este tutorial. El uso del código y la documentación adjunta son próximos.

1. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL PROCEDIMIENTO DE ACOPLAMIENTO

Modelamiento hidrológico en zona de llanura a través del acoplamiento del modelo hidrológico semidistribuido Soil and Water Assessment Tool (SWAT, 2012) el cual simula procesos de flujo agua superficiales, con el modelo hidrogeológico distribuido (MODFLOW, 2005) el cual simula los procesos de flujo de agua en la zona subterránea.

Este acoplamiento es desarrollado por la Ryan T. Bailey (Departamento de ingeniería civil y medio ambiente. Universidad del Estado de Colorado, en asociación con la Departamento de Agricultura de los Estados Unidos y la Universidad de Texas.

Para simular procesos a través del acoplamiento entre el modelo SWAT y el modelo MODFLOW, se requiere una vinculación especial para pasar las unidades de respuesta hidrológica (HRUS) discretizadas por el modelo SWAT (semidistribuido) a las unidades espaciales a través de una cuadrícula de celdas (grid cells) modelo MODFLOW (distribuido).

Las siguientes son las variables de estado que se pasan entre los dos modelos:

- Calculo de la percolación profunda del suelo (este cálculo es realizado por el modelo SWAT por medio del balance hidrológico calculado en las HRUS y este cálculo se pasa a celdas de la cuadrícula Modflow)
- Calculo de la evapotranspiración potencial (cálculo realizado con el modelo SWAT HRUS a celdas de la cuadrícula Modflow)
- Delimitación del cauce del arroyo y subcuencas (modelo SWAT a celdas de rio Modflow)
- Descarga aguas subterráneas (a partir celdas rio MODFLOW a subcuencas SWAT)
- Elevación del nivel freático (desde la cuadrícula de celdas MODFLOW a HRUS SWAT)

Las HRUS en el modelo SWAT no tienen una ubicación geográfica determinada, debido a que las HRUS están desglosadas en pre-rutinas de procesamiento de SIG unión de (cobertura, suelo, pendiente).

Esta desagregación divide un HRU en polígonos individuales los cuales si tienen una ubicación geográfica específica. Estos valores desagregados HRUS son llamados (DHRUs) los cuales se utilizan para transmitir las variables entre el modelo SWAT al modelo MODFLOW.

En la Fig. 1 se muestra una rejilla MODFLOW la cual tiene (16 filas, 21 columnas) y una subcuenca discretizada con el modelo SWAT con 4 HRUS diferentes (cada una con un color diferente). La HRU # 4 se puede dividir para crear 3 DHRUs, cada uno con una ubicación geográfica diferente. Estas DHRUs son intersectados con la red del modelo MODFLOW, con el resultado de las áreas ponderadas utilizadas para pasar información entre el modelo SWAT al modelo MODFLOW.

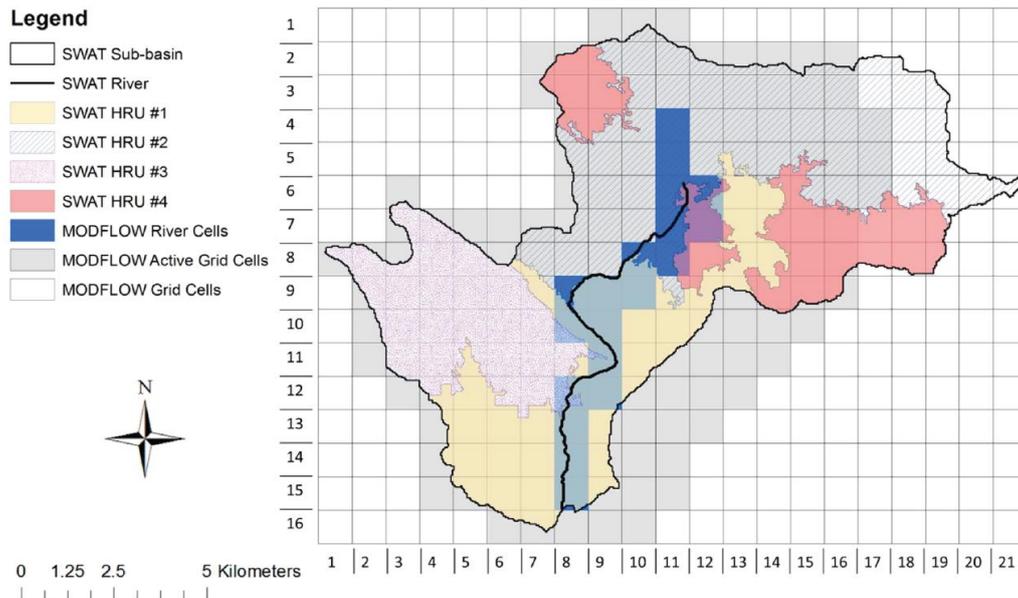


Fig. 1. Vinculación de las HRUS modelo SWAT a la cuadrícula de celdas modelo MODFLOW.

El modelo MODFLOW se denomina como una subrutina dentro del código modelado por SWAT. Reemplaza las subrutinas originales de aguas subterráneas del modelo Swat. Por defecto, el modelo MODFLOW simula a escala diaria. Sin embargo, cualquier frecuencia se puede especificar en el archivo [swatmf_link.txt](#) (véase en la siguiente sección). Los siguientes pasos son seguidos dentro del código para acceder al acoplamiento de SWAT y MODFLOW:

Para cada día (o especificando la frecuencia de simulación Δt de MODFLOW):

1. Se realizan cálculos por HRU en el modelo SWAT
2. Se pasa la información cartográfica de SWAT a la rejilla de MODFLOW
 - Se desagregan los valores HRU para pasar estos valores a DHRUs.
 - Los valores de DHRUs se asignan a la cuadrícula de celdas MODFLOW, las subcuencas y cauces se asignan a las celdas río de MODFLOW
3. Ejecutar MODFLOW a nivel diario
4. Información cartográfica del modelo MODFLOW al modelo SWAT
 - Valores de descarga de agua subterránea de las celdas del modelo MODFLOW se asignan a las subcuencas del modelo SWAT
 - Altura del nivel freático calculado por el modelo MODFLOW es asignado a las HRUS del modelo SWAT.

Además de la salida típica de ambos modelos (caudal, nivel en el cauce, nivel del agua subterránea), por medio de este código puede también obtener las siguientes variables de salida:

- Percolación profunda para cada HRU SWAT (=recarga de celdas de MODFLOW (mm))
- Recarga para cada celda de la cuadrícula MODFLOW ($m^3/día$)
- Profundidad del canal para cada subcuenca SWAT (m)
- Nivel del cauce para cada celda río en MODFLOW (m)
- Intercambio entre flujo de agua superficial con el flujo de agua subterránea para cada celda río MODFLOW ($m^3/día$)
- Intercambio entre flujo de agua superficial con el flujo de agua subterránea para cada subcuenca SWAT($m^3/día$)

Estas salidas pueden ser usadas para crear mapas de la cuenca. Por ejemplo, en la Fig. 2a se observa la variación espacial de la recarga media diaria de agua, proporcionada del nivel freático, por la percolación profundidad del suelo, y en la Fig. 2b se muestra la variación espacial de la descarga desde el acuífero a la red de drenaje por ejemplo para una cuenca.

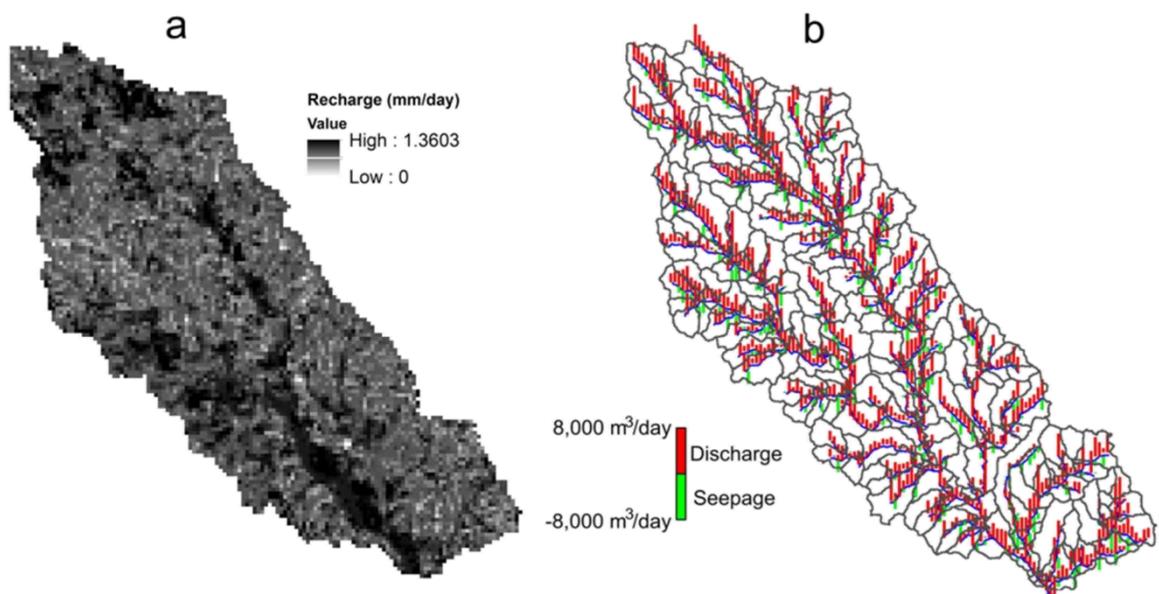


Fig. 2. a) Promedio diario de recarga (mm/día), b) promedio diario de descarga ($m^3/día$) para una cuenca simulada por el acoplamiento SWAT-MODFLOW.

2. CREACIÓN DEL ACOPLAMIENTO ENTRE SWAT-MODFLOW

La información requerida para el acoplamiento HRUs, DHRUs, subcuencas SWAT y cuadrícula de celdas MODFLOW, está contenida en 4 archivos de texto, los cuales se leen al principio de la simulación SWAT-MODFLOW.

Estos archivos de texto son:

1. [swatmf_dhru2hru.txt](#) (relacionado HRUs a DHRUs)
2. [swatmf_dhru2grid.txt](#) (relacionado DHRUs a celdas MODFLOW)
3. [swatmf_grid2dhru.txt](#) (relacionado a las celdas MODFLOW a DHRUs)
4. [swatmf_river2grid.txt](#) (relacionado celdas río (MODFLOW) a Subcuencas (SWAT))

La vinculación de información es almacenada en la memoria durante la simulación y es usada cuando las variables son pasadas entre los dos modelos. El proceso de creación de cada archivo de texto es el siguiente:

1. Realizar la intersección básica/ extracción de rutinas en un SIG
2. Preparar las tablas que contienen los resultados de las rutinas del SIG.
3. Ejecutar un programa FORTRAN que crea la entrada de los 4 archivos de texto (.txt) los cuales son la entrada para el acoplamiento de SWAT-MODFLOW.

Este proceso se describe ahora con más detalle. Tablas de ejemplo y archivos de entrada SWAT-MODFLOW se proporcionan en esta documentación.

2.1 Proceso de vinculación usando las rutinas de Arcgis

Vínculo entre la HRUS y desagregación de HRUS (DHRUs)

- a. Comience con el shapefile de HRU (sin umbrales)
- b. Aplicar la operación SIG "multiparte a Singlepart" para obtener DHRU desde shapefile HRU
- c. Obtener el área, identificación única (ID), y subcuenca para cada DHRU
- d. Proporcionar archivo de texto: hru_dhru. Este archivo está ordenado por la HRU y el ID DHRU.

En la parte superior del archivo:

- Número de DHRUs
- Número de HRUS

A continuación, las siguientes columnas:

dhru_id: Identificación única (ID) de DHRU (numeración secuencial)
dhru_area: Área espacial (m²) De la DHRU
dhru hru_id: Identificación (ID) de la HRU de la cual se origina DHRU
dhru subcuenca: Identificación (ID) de la Subcuenca
hru_area: Área espacial (m²) De la HRU originales

```

1 27396
2 6233
3 dhru_id dhru_area hru_id subbasin hru_area
4 1 9000 1 1 153900
5 2 900 1 1 153900
6 3 900 1 1 153900
7 4 900 1 1 153900
8 5 45900 1 1 153900
9 6 89100 1 1 153900
10 7 7200 1 1 153900
11 8 900 2 1 7200
12 9 900 2 1 7200
13 10 900 2 1 7200
14 11 900 2 1 7200
15 12 1800 2 1 7200
16 13 1800 2 1 7200

```

Vínculo entre la DHRUs y celdas de MODFLOW

- a. Intersección del shapefile de celdas de MODFLOW con el shapefile DHRU
- b. Calcular el área de superposición entre las celdas MODFLOW y la DHRUs
- c. Proporcionar un archivo de texto: dhru_grid

En la parte superior del archivo:

Número de líneas con información (a partir de la línea 4)
 Número de celdas de MODFLOW

A continuación, las siguientes columnas: (ordenados por grid_id, luego por dhru_id):

grid_id: identificador único (ID) de la cuadrícula de celdas MODFLOW (sólo las celdas que se intersectan con la DHRUs)

grid_area: Área espacial (m²) de la cuadrícula de celdas

dhru_id: Identificación (ID) de la DHRU

overlap_area: Área de superposición (m²) entre la celda y la DHRU

área dhru: Área espacial (m²) de la DHRU

```

1 65869
2 20925
3 grid_id grid_area dhru_id overlap_area dhru_area
4 1635 40000 27 919.357 9900
5 1636 40000 27 7828.82 9900
6 1756 40000 1158 18161.5 76500
7 1757 40000 1158 7914.35 76500
8 1757 40000 1159 477.83 272700
9 1757 40000 1368 1116.06 9000
10 1758 40000 1159 80.1997 272700
11 1760 40000 1159 10209.3 272700
12 1761 40000 1145 558.03 900
13 1761 40000 1146 900 900
14 1761 40000 1148 900 900
15 1761 40000 1159 2354.95 272700
16 1763 40000 1147 2016.06 5400

```

d. Proporcionar el archivo de texto: grid_dhru. El mismo contenido que en el archivo dhru_id, ordenados excepto por dhru_id, y grid_id. Además, la siguiente información es necesaria en el comienzo del archivo:

Número de filas (en la cuadrícula de MODFLOW)

Número de columnas (en la cuadrícula de MODFLOW)

```

1 65869
2 27396
3 155
4 135
5 grid_id grid_area dhru_id overlap_area dhru_area
6 2316 40000 1 1416.06 9000
7 2451 40000 1 6725.25 9000
8 2452 40000 1 858.695 9000
9 2316 40000 2 900 900
10 2316 40000 3 900 900
11 2175 40000 4 291.82 900
12 2176 40000 4 266.21 900
13 2310 40000 4 178.832 900
14 2311 40000 4 163.138 900
15 2041 40000 5 3374.65 45900
16 2042 40000 5 9015.5 45900
17 2176 40000 5 12561.2 45900
18 2177 40000 5 20948.6 45900

```

Vinculación entre las celdas rio de MODFLOW y subcuencas

a. Intersección de la red de drenaje de SWAT con las celdas de MODFLOW.

- b. Calcular la longitud de cada segmento de río dentro de cada celda de cuadrícula.
- c. Obtener la subcuenca para cada celda de cuadrícula intersectada.
- d. Obtener grid_id para cada celda.
- e. Proporcionar el archivo: river_grid

En la parte superior del archivo:

Número de líneas con información (comenzando sobre la línea 3)

A continuación, las siguientes columnas (clasificadas según la columna de la cuadrícula, luego por fila de la cuadrícula: debe ser en el mismo orden que en el archivo modflow.riv):

grid_id: Identificación única (ID) de la celda de la cuadrícula de MODFLOW

subcuenca: Identificación única (ID) de la subcuenca

rgrid_len: Longitud del cauce en la celda de la cuadrícula

```

1  1967
2  grid_id subbasin rgrid_len
3  2434    9      19.00
4  2569    9      189.00
5  4189   26     217.00
6  2570    9     213.00
7  2705    9     72.00
8  4190   26     18.00
9  4325   26    223.00
10 2706    9     278.00
11 2841    9     10.00
12 4326   26    180.00
13 4461   26     82.00
14 2842    9    248.00
15 2977    9     95.00
16 4462   26    279.00

```

2.2 Creación de los archivos de entrada SWAT-MODFLOW

a. Coloque los archivos hru_dhru, dhru_grid, grid_dhru y river_grid dentro de la carpeta con el *CreateSWATMF.exe* programa FORTRAN.

b. Ejecutar *CreateSWATMF.exe*. Este proceso ejecución sólo durará 10-30 segundos. Esto creará los siguientes archivos:

- swatmf _dhru2hru.txt
- swatmf _dhru2grid.txt
- swatmf _grid2dhru.txt
- swatmf _river2grid.txt

c. Crear el archivo `swatmf_link.txt` (vea el archivo de ejemplo). Este archivo de texto contiene la información básica para la simulación con SWAT-MODFLOW.

- I. Incluyendo bandera para MODFLOW (0 o 1)
- II. Incluyendo bandera para 3DTR (0 o 1) (para la vinculación 3DTR, véase en la sección V a continuación)
- III. Frecuencia de ejecución de MODFLOW (número de días entre las llamadas MODFLOW)
- IV. Banderas de salida del modelo opcional (0 o 1)
- V. Bandera de celdas de observación de lectura (archivo de observación se ha creado). Si se desea, un archivo `modflow.obs` puede ser creado. Este archivo contiene los índices (I, J, K) para celdas de la cuadrícula cuyos datos principales de las aguas subterráneas serán de salida para cada paso de tiempo

2.3 Reemplazo de los paquetes SFR o STR con el paquete RIV

El modelo SWAT-MODFLOW usa el Paquete río (RIV) para simular la interacción del agua subterránea y superficial (descarga del acuífero hacia el río; infiltración de la río hacia al acuífero). Nivel del río es proporcionada por el modelo SWAT. Si el modelo original MODFLOW utiliza otra condición de contorno u otro paquete de enrutamiento en el cauce (por ejemplo, paquete río, paquete de enrutamiento de caudales), éstos se deben reemplazar por el paquete río.

Cambio del paquete RIV (río):

- Retire el archivo `.str` o archivos `.sfr` desde el modelo
- Crear un archivo de entrada `.riv`: después del primer período de estrés, escribir "**-1 0**" para copiar la información de cada periodo de estrés. SWAT-MODFLOW utilizará la información de la celda (capa, fila, columna, conductancia, nivel del río), y SWAT suministrara el nivel del río.

3. Correr la simulación SWAT-MODFLOW

Coloque los siguientes archivos en la carpeta que contiene el modelo original de SWAT:

- Archivos de entrada MODFLOW
- El nombre del archivo MODFLOW (cambiar el nombre por `modflow.mfn`). Dentro del nombre del archivo, añadir 5,000 a cada número entero de identificación de archivo. Esto se hace para que los archivos enteros no entren en conflicto con los archivos de entrada / salida de SWAT.
- `swatmf_link.txt`
- Archivos cartográficos:
 - `swatmf_dhru2hru.txt`
 - `swatmf_dhru2grid.txt`
 - `swatmf_grid2dhru.txt`
 - `swatmf_river2grid.txt`

2. Ejecutar SWAT_MODFLOW.exe (en lugar del ejecutable original de SWAT)
3. Además de los principales archivos de salida de SWAT y MODFLOW, los archivos designados para la salida de `swatmf_link.txt` estará contenido en la carpeta principal y comenzaran con `swatmf_out_`

4. Calidad del Agua usando SWAT-MODFLOW- RT3D

El código de modelado incluye una llamada a RT3D (transporte reactivo en 3 dimensiones) por MODFLOW. RT3D simula el transporte reactivo de solutos a través del sistema acuífero. La masa de nitrato en el agua por percolación profunda se pasa a RT3D celdas de la cuadrícula (la misma red usada por MODFLOW), y MODFLOW calcula la concentración de nitrato de celda por celda en el acuífero y la masa de nitrato del acuífero al cauce. Si se desea utilizar RT3D, varios archivos de entrada son necesarios y la bandera "rt_active" en `swatmf_link.txt` debe ser igual a 1.

Esta parte del código todavía está siendo probado. El uso del código y la documentación adjunta son próximos.