

# SIMULACIÓN DE PROCESOS HIDROLÓGICOS EN CUENCAS POCO INSTRUMENTADAS

IGNACIO SÁNCHEZ COHEN PALMIRA BUENO HURTADO GERARDO ESQUIVEL ARRIAGA  
MIGUEL AGUSTÍN VELÁSQUEZ VALLE



**SAGARPA**  
SECRETARÍA DE AGRICULTURA,  
GANADERÍA, DESARROLLO RURAL,  
PESCA Y ALIMENTACIÓN



**inifap**  
Instituto Nacional de Investigaciones  
Forestales, Agrícolas y Pecuarias

Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en  
Relación Agua, Suelo, Planta, Atmósfera  
Gómez Palacio, Durango, Diciembre 2014  
Folleto Técnico Núm. 35, ISBN: 978-607-37-0314-7

DIRECTORIO INSTITUCIONAL

SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA, DESARROLLO  
RURAL, PESCA Y ALIMENTACIÓN

LIC. ENRIQUE MARTÍNEZ Y MARTÍNEZ  
SECRETARIO

LIC. JESÚS ALBERTO AGUILAR PADILLA  
SUBSECRETARIO DE AGRICULTURA

PROF. ARTURO OSORNIO SÁNCHEZ  
SUBSECRETARIO DE DESARROLLO RURAL

LIC. RICARDO AGUILAR CASTILLO  
SUBSECRETARIO DE ALIMENTACIÓN Y COMPETITIVIDAD

INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACIONES FORESTALES,  
AGRÍCOLAS Y PECUARIAS

DR. LUIS FERNANDO FLORES LUI  
DIRECTOR GENERAL

DR. MANUEL RAFAEL VILLA ISSA  
COORDINADOR DE INVESTIGACIÓN, INNOVACIÓN Y  
VINCULACIÓN

DR. JORGE FAJARDO GUEL  
COORDINADOR DE PLANEACIÓN Y DESARROLLO

M. A. EDUARDO FRANCISCO BERTERAME BARQUÍN  
COORDINADOR DE ADMINISTRACIÓN Y SISTEMAS

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN DISCIPLINARIA EN  
RELACIÓN  
AGUA-SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA

DR. JOSÉ ANTONIO CUETO WONG  
DIRECTOR

**SIMULACIÓN DE PROCESOS HIDROLÓGICOS EN  
CUENCAS POCO INSTRUMENTADAS**

Ignacio Sánchez Cohen  
Palmira Bueno Hurtado  
Gerardo Esquivel Arriaga  
Miguel Agustín Velásquez Valle

**CENID-RASPA**

**2014**

Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y  
Pecuarias

Progreso No. 5, Barrio de Santa Catarina Delegación Coyoacán

C.P. 04010 México, D. F.

Teléfono (55) 3871 - 8700

ISBN: 978-607-37-0314-7

Primera edición 2014

Derechos Reservados ©

*No está permitida la reproducción total o parcial de esta publicación, ni la transmisión de ninguna forma o por cualquier medio, ya sea electrónico, mecánico, fotocopia, por registro u otros métodos, sin el permiso previo y por escrito de la institución.*

## CONTENIDO

SIMULACIÓN DE PROCESOS .....	2
Secuencia para estudios de Simulación .....	3
i)    Formulación del problema .....	3
ii)   Establecer los objetivos y el plan para el desarrollo del modelo .....	5
iii)  Conceptualización del modelo .....	6
iv)   Colección de datos .....	7
v)    Codificación del modelo .....	7
vi)   Verificación del modelo .....	7
Métodos de aproximación .....	9
MODELACIÓN DE PROCESOS EN CUENCAS POCO INSTRUMENTADAS .....	11
Modelo WEAP .....	12
Presentación del modelo WEAP .....	12
Descripción de la interfaz gráfica de WEAP .....	13
Creación de un área de trabajo en WEAP .....	14
Descripción de los parámetros de uso de suelo .....	17
Descripción de los parámetros de clima .....	19
Generar suposiciones clave (Key assumptions) .....	21
Introducción de elementos al esquema .....	24
Primeros resultados .....	42
Estableciendo sitios de demanda .....	43
Fuentes de datos .....	48

Modelo SWAT .....	49
Antes de iniciar.....	50
Crear un nuevo proyecto.....	59
Delineación de la cuenca .....	61
Análisis de Unidades de Respuesta Hidrológica .....	63
Definición de los cuadros de entrada.....	67
Edición de datos de entrada .....	69
Corriendo el modelo .....	70
Análisis de Sensibilidad .....	71
Calibración .....	73
Análisis de sensibilidad y calibración con el uso de herramientas de SWAT .....	74
Análisis de sensibilidad fuera del modelo .....	86
Calibración fuera del modelo .....	87
LITERATURA CITADA .....	89

## INTRODUCCIÓN

La restauración de ecosistemas deteriorados no es posible sólo por medio de normatividad, cambios en las leyes, grandes inversiones o argumentaciones burocráticas. La recuperación de estas áreas sólo es posible si participan en su planeación los acreedores de intereses afectados y considerando la integración de factores económicos, ecológicos y sociales (NRC, 1999). Nuestra sociedad se ha vuelto cada día más inquisitiva en relación a la calidad del ambiente; sin embargo, poco o nulo es el conocimiento del impacto de nuestras acciones en el balance ecológico que define el estado de los recursos naturales. Más aún, siendo una sociedad con una alta dependencia del bienestar en actividades agropecuarias, debiera de ser un paradigma de estado la restauración, mantenimiento y conservación de la integridad física, química y biológica de los recursos naturales en los que el agua aparece como mecanismo vector y rector de las actividades económicas.

Acorde a los hechos, es claro que existe una sensibilidad incipiente a la preservación de estos recursos; sin embargo, es posible crear conciencia en la medida que los usufructuantes del patrimonio nacional sustenten su prosperidad económica en la calidad de sus productos, que dependen en gran medida en prácticas de manejo que integran sistemas naturales y humanos. Es precisamente en este punto donde adquieren relevancia las *cadena productivas*, que sucintamente pueden ser definidas como los procesos involucrados en la obtención de satisfactores por sistema producto, considerando factores económicos, agronómicos, sociales y de mercado.

Las cadenas productivas ocurren bajo ambientes agro-ecológicos distintivos que definen su potencial. Ese ambiente se da por una serie de interacciones de clima, suelo y economía principalmente; de estos, el clima define por mucho la disponibilidad del recurso agua. Es por esto que una cuenca preferentemente debe ser definida por la capacidad de “generar” el recurso agua en función de sus características fisiográficas y ecológicas.

Por lo anterior, es necesario considerar a la cuenca hidrológica como unidad básica de planeación, teniendo como argumento los siguientes aspectos (Sánchez, 2005; Sánchez *et al.*, 2007):

- Las interacciones complejas que ocurren en las cuencas requieren integrar objetivos institucionales y productivos para arribar a estrategias balanceadas.
- El proceso de toma de decisiones necesariamente debe involucrar a usuarios y técnicas de consenso para obtener un plan de manejo técnica y socialmente soportado que refleje el balance negociado de intereses.
- Necesidad de usar información generada, mediante estudios científicos para el rendimiento adecuado de los procesos que afectan a los ecosistemas, con impacto en las cadenas productivas y en las condiciones económicas y de salud de la población.
- El concepto tiene como objetivo el diseño y uso de métodos efectivos que involucren a todos los usuarios con beneficios y costos compartidos.
- Se busca un marco de acuerdos inter e intra institucionales (instituciones que participan con objetivos comunes en el proceso de dar sustentabilidad a los recursos naturales) que garantice la implementación de los planes desarrollados en el proceso de toma de decisiones, los cuales descansan más en el interés que en leyes.
- Necesidad de contar con un procedimiento de monitoreo que evalúe los efectos del manejo de la cuenca con mediciones y estándares bien definidos.

## **SIMULACIÓN DE PROCESOS**

La simulación de procesos es una actividad con la cual el usuario puede obtener conclusiones relativas al comportamiento de un sistema dado por medio del estudio de un modelo cuya relación causa-efecto es la misma (o similar) a la del sistema original (Sánchez *et al.*, 2013). Así entonces, la simulación se circunscribe al desarrollo y uso de modelos que describen realísticamente el comportamiento de un sistema.

Las razones del por qué utilizar la simulación de procesos para la solución de problemas se pudieran agrupar en dos grandes categorías:

- 1) Como herramienta de investigación.
- 2) Como herramienta para el soporte de toma de decisiones.

En el primer caso, la simulación de procesos asiste en el entendimiento (y quizás cuantificación) *ex-ante* de las relaciones funcionales entre variables de interés, con la finalidad de dirigir el esfuerzo y los recursos de investigación de manera certera. En el segundo caso, la simulación de procesos pretende auxiliar al tomador

de decisiones en cuanto a la evaluación del efecto de una determinada acción sobre el sistema en estudio (Sánchez, 1994).

Muchos modelos han sido desarrollados para auxiliar a los modeladores y tomadores de decisiones a entender la operación de diversos sistemas y proveer un pronóstico del comportamiento futuro bajo ciertas condiciones de manejo; tal pronóstico puede realizarse con respecto a tiempo real (pronóstico, comúnmente asociado con la reconstrucción del pasado) o sin ningún tiempo específico de referencia (predicción, a menudo asociado con la construcción del futuro) (Wilks, 1995). Esta jerarquización ubica al problema en el tiempo, mientras que una segunda jerarquización sería ubicar al problema en el espacio al considerar la variabilidad espacial y la regionalización. En hidrología, las relaciones matemáticas que describen a un fenómeno son frecuentemente dependientes de la escala en el sentido de que diversas relaciones se manifiestan en diversas escalas de espacio y tiempo. La ciencia se ocupa actualmente de identificar y formular relaciones apropiadas a las escalas de interés práctico, probarlas experimentalmente y buscar conexiones analíticas consistentes entre estas relaciones y otras a diferentes escalas.

#### Secuencia para estudios de Simulación

La gran mayoría de los modelos de simulación relativos al uso racional del agua para uso agropecuario carecen de usuarios por diversas causas entre las que destacan el costo excesivo de su aplicación y el no haber considerado a los usuarios potenciales en su formulación. La Figura 1 muestra una serie de pasos que han de observarse para la conducción de un estudio que involucre simulación de procesos. Diversos autores han propuesto secuencias similares, entre ellas el de Law y Kelton (1982), en el presente manual se emplea la de Banks (1998). Los pasos a seguir se describen a continuación:

##### i) Formulación del problema

Cada estudio de simulación empieza con la descripción del problema. Si la descripción se realiza por el usuario directo (el que tiene el problema), el investigador o técnico deberá tener el cuidado suficiente de entender bien el problema. Por otra parte, si el investigador y / o el técnico son los que formulan el problema, el usuario deberá estar de acuerdo con la secuencia lógica del planteamiento del mismo y de sus asunciones. ***Aquí es pertinente mencionar que no hay situación tan improductiva como plantear***

***una buena solución a un problema mal entendido*** por lo que en la formulación del problema deberán observarse los siguientes puntos:

a) Seleccionar el grupo interdisciplinario

En el caso específico de problemas relacionados a la disponibilidad de agua para uso agropecuario es deseable que el grupo incluya a: un especialista en uso y manejo del agua, un experto en climatología, especialista en física de suelos, experto en fisiología del agua, programador de computadoras, un especialista en sociología rural, y un representante de los usuarios potenciales.

b) Iniciar las sesiones de trabajo con expectativas

Las expectativas de los usuarios potenciales son las que normarán el seguimiento en la formulación del problema y deberán traerse a luz continuamente. Por ejemplo, la expectativa de los usuarios pudiera ser evadir el riesgo implícito a la agricultura de temporal, por lo que, el modelo deberá ser capaz de ofrecer alternativas técnicas para definir sembrar y/o proponer dimensiones de obras de captación del agua de lluvia. Es necesario contemplar en este paso la situación de aversión al riesgo en términos económicos en virtud de que la solución técnica al problema pudiera estar fuera del alcance de los usuarios.

c) Obtener información de los usuarios estratégicamente

Es muy común que la persona, formulando el modelo para solucionar el problema, sesgue el objetivo del modelo acorde a su especialidad, por lo que, la labor del equipo interdisciplinario es centrar el objetivo al problema planteado, considerando la información del marco de referencia. En este sentido, considerando el mismo ejemplo de disponibilidad de agua para uso agropecuario, una pregunta pobremente planteada a los usuarios sería: ¿su sistema productivo funciona de manera adecuada?; podría obtenerse mayor información si el planteamiento fuera: ¿qué aspectos de su sistema productivo necesitan ser atendidos y por qué?

d) Predecir la solución

Al inicio del proyecto se debe solicitar a los usuarios que realicen un rápido análisis del problema; con esto se logra concentrarse más en el problema que en el modelo lo que provee de claridad en algunos aspectos que pudieran permanecer oscuros y se pudiera vislumbrar una posible solución. También se evitan ideas preconcebidas que restringen el universo de soluciones. Otra ventaja de este paso es que una vez que se obtiene la solución real al problema, se tiene un punto de comparación de la solución inicial planteada y la real pudiendo entonces establecer cuestionamientos que llevarían a un entendimiento más profundo del sistema.

ii) Establecer los objetivos y el plan para el desarrollo del modelo

Los objetivos indican las preguntas que deben ser contestadas por el estudio de simulación. Así, el proyecto deberá incluir una descripción de los posibles escenarios que serán estudiados. Los planes para el desarrollo del estudio deben incluir los tiempos necesarios para desarrollar cada paso, el personal necesario así como las necesidades de *hardware* y *software*.

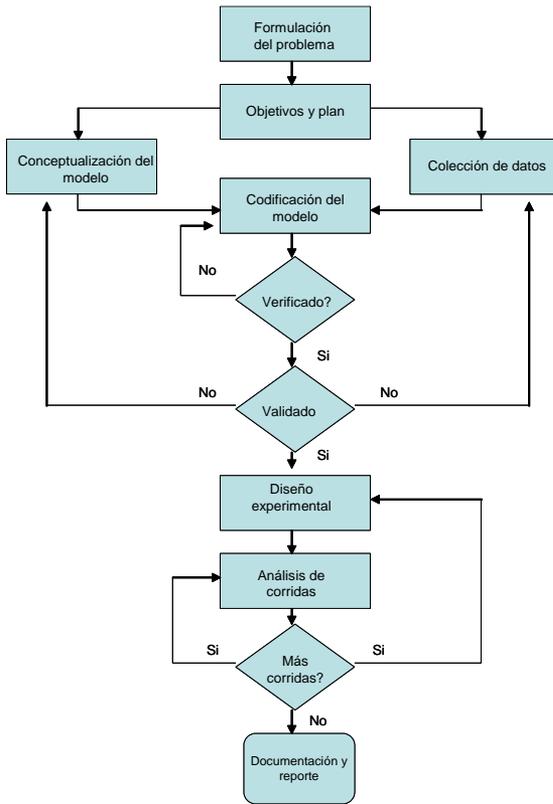


Figura 1. Seguimiento para la construcción de un modelo de simulación

### iii) Conceptualización del modelo

En esta etapa el sistema real a ser modelado debe de abstraerse en un modelo conceptual el cual consiste en una serie de relaciones matemáticas y lógicas concernientes a los componentes y la estructura del sistema. Se recomienda empezar con un modelo simplista que crezca en complejidad conforme el objetivo lo requiera. Así como también elaborar diagramas de flujo que indiquen la secuencia lógica de las operaciones que realizará el modelo. Es pertinente mantener en mente la información disponible (base de datos) cuando se seleccionen las funciones matemáticas que describen las relaciones entre variables. Como se verá más adelante, se puede elegir entre la construcción de un modelo simplista empírico, o un modelo físicamente fundamentado que

requerirá de cierta información para cuantificar sus parámetros; de hecho, los vacíos de conocimiento son la justificación para el planteamiento de proyectos de investigación.

iv) Colección de datos

Toda vez que el método de aproximación ha sido seleccionado y su estructura ha sido consensuada en el seno del equipo de trabajo, es necesario el asentar el tipo de datos o información necesaria para el modelo. Muy comúnmente, la información no se encuentra en el formato requerido ni con la periodicidad deseada; por ejemplo, en la simulación del balance hídrico en un sistema de captación de agua es necesario el contar con una base de datos diaria de precipitación; si no se cuenta con esta información se debe proceder al uso de generadores de clima los cuales requieren de estadísticos primarios para su parametrización.

v) Codificación del modelo

En este paso el modelo conceptual construido se codifica en un lenguaje computacional, o es transformado a *lenguaje máquina*. Esto constituye el modelo operacional.

vi) Verificación del modelo

La verificación del modelo confirma si éste trabaja adecuadamente acorde a lo planeado, es decir, se verifica que el modelo operacional refleje con precisión el modelo conceptual. Es muy recomendable que la verificación se realice como un proceso continuo y no esperar hasta que el código esté completo para dar inicio a la verificación. Esto da la ventaja de detectar errores de lógica u omisión en etapas tempranas del desarrollo. Los siguientes puntos son recomendables en esta etapa:

1) Seguir los principios de programación estructural

Es pertinente dividir el modelo en sub módulos o sub rutinas para tener la facilidad de acceso y de entendimiento del diagrama de flujo. También, esta característica facilita el proceso de compilación del lenguaje fuente.

2) Documentar el código tanto como sea posible

Incluir comentarios entre las líneas de código indicando que realizará el modelo de ese punto en adelante hasta que el próximo comentario aparezca. Este proceso facilita que los usuarios del modelo entiendan los procesos o etapas en las que el código está dividido. También, auxilia si el código necesita ser reeditado o expandido en sus capacidades.

### 3) Revisión del código por más de una persona

Este es un paso que propicia claridad en la secuencia lógica del modelo operacional y garantiza una estructura de código entendible.

Inspeccionar que los datos de entrada serán usados correctamente. Por ejemplo, si las unidades de precipitación están en milímetros (mm). La estructura numérica del modelo de escurrimiento deberá considerar esta información para que exista congruencia entre unidades. Es pertinente recalcar que las unidades universales de reporte son el sistema métrico decimal.

#### vii) Validación

Es el proceso de comparar las salidas del modelo con salidas observadas en el sistema real en concordancia con las condiciones teóricas con las que el modelo fue desarrollado.

Este apartado comprende cuatro pasos importantes:

Verificación: constatar que el programa computacional realice las acciones para las que fue desarrollado.

Identificación de parámetros: consiste en usar el modelo computacional y base de datos para la obtención de los valores de los parámetros.

Determinación de parámetros: es el proceso de establecer relaciones entre parámetros y variables medibles.

Análisis de sensibilidad: es el proceso de identificar aquellos parámetros o entradas al modelo que repercuten sensiblemente en las salidas.

#### viii) Diseño experimental

Es necesario preestablecer el número de simulaciones necesarias para obtener información de los escenarios hipotéticos que serán evaluados; también, se debe fijar de qué manera serán inicializadas

las corridas. Esta etapa de diseño básicamente consiste en encontrar las combinaciones de variables o parámetros que serán evaluadas en un experimento utilizando el modelo de simulación. Así, los resultados (salidas del modelo) analiza la relación entrada – salida del experimento para derivar conclusiones relativas a la importancia de las variables. El análisis de sensibilidad del modelo involucra el diseño de un experimento, en donde se definen qué variables y en qué magnitud se variarán como entradas al modelo para definir su peso relativo en las salidas del modelo, y así, poder identificar aquellas variables que por sí mismas merecen mayor atención en su cuantificación. La parte medular del estudio es entonces, el análisis de varianza de los resultados o la obtención de la ecuación de regresión.

### Métodos de aproximación

En hidrología, existen diversas clasificaciones que agrupan a los modelos de escurrimiento acorde a su estructura matemática y objetivo (véase Figura 2). Sin embargo, se pudiera establecer dos aproximaciones fundamentalmente diferentes en el "arte" de modelar: 1) aproximación física, basada en procesos y 2) aproximación empírica o modelos de caja negra. La aproximación física se fundamenta en el requerimiento para describir los sistemas en términos de leyes fundamentales o principios teóricos de la ciencia. Esta aproximación científica provee el potencial para describir los mecanismos relevantes que controlan el sistema, la naturaleza de sus interacciones y su variabilidad temporal y espacial (Singh y Kumar 1993).

La aproximación es compleja y en general la descripción de la dinámica del sistema involucra el uso de ecuaciones diferenciales no lineales, las cuales se solucionan por métodos numéricos. Los parámetros en esta aproximación tienen significado físico representando características tales como: dimensión, velocidad o temperatura, que pueden medirse en el contexto de sistemas reales. La aplicación de estos modelos requiere que las condiciones iniciales y de frontera que describen el estado inicial del sistema sean especificadas. Se deberá tener cuidado de aplicar el modelo dentro del rango de las asunciones consideradas para su desarrollo.

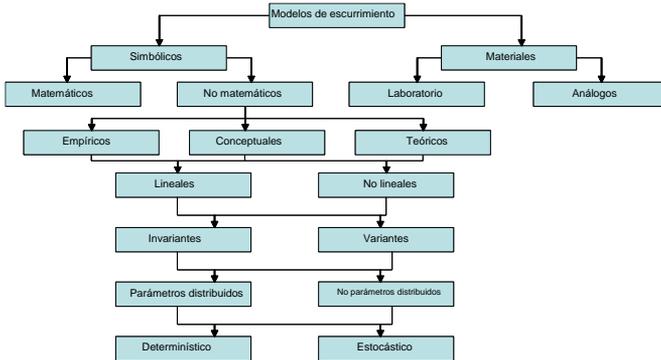


Figura 2. Agrupación de modelos acorde a su estructura y objetivo (adaptado de Singh, 1992).

La aproximación empírica trata de describir el sistema en términos de relaciones estadísticas o relaciones empíricas (Sánchez *et al.*, 2014). Estos modelos pueden variar en complejidad, desde simples ecuaciones que involucran un solo parámetro, el cual por sí mismo representa un índice del efecto neto de un rango de características y procesos promediados o integrados en espacio y tiempo, a ecuaciones más complejas que involucran más parámetros. A diferencia de los modelos físicos, los modelos empíricos proveen poca o nula información relacionada a los mecanismos internos del sistema (Singh, 1996).

La aplicación de modelos empíricos está limitada por dos condiciones: 1) su aplicabilidad se restringe a las condiciones en las que los parámetros fueron calibrados y 2) no pueden utilizarse para explorar la operación interna del sistema físico que tratan de describir. Los modelos físicos y modelos empíricos pueden subdividirse en: modelos deductivos (determinísticos) o inductivos (probabilísticos). Se dice que el proceso y su modelo son determinísticos si se ignora la probabilidad de ocurrencia de las variables que describen el proceso y el modelo sigue una ley definida de certidumbre (pero no una ley probabilística). En cambio, si se considera la probabilidad de ocurrencia de las variables y los conceptos de probabilidad se consideran cuando se formula el modelo, el proceso y su modelo son descritos como estocásticos (dependiente del tiempo) ó probabilístico (no dependiente del tiempo).

Para procesos probabilísticos no dependientes del tiempo, la secuencia de ocurrencia de las variables involucradas en el

proceso se ignora y se asume que la probabilidad de su ocurrencia sigue una distribución definida de probabilidad en la cual las variables se consideran puramente aleatorias (Haan, 1982).

Para procesos estocásticos dependientes del tiempo se toma en cuenta la secuencia de ocurrencia de las variables, las cuales pueden ser puramente aleatorias o no aleatorias y su distribución de probabilidad puede variar o no en el tiempo (condición de estacionalidad o no estacionalidad). En las variables puramente aleatorias los elementos de las series de tiempo son independientes, constituyendo por esto una secuencia aleatoria. En las variables no aleatorias los elementos de las series de tiempo son dependientes entre ellos y poseen un componente determinístico y un componente aleatorio, constituyendo una secuencia no aleatoria.

Un método intermedio entre modelos estocásticos y determinísticos lo constituye la aproximación paramétrica, la cual se define como el desarrollo y análisis de relaciones funcionales entre parámetros físicos involucrados en eventos hidrológicos para su uso en la generación o sintetización de información hidrológica (Gottfried, 1984). El proceso de discernir qué tipo de aproximación usar queda circunscrito a la cantidad de información disponible. En tal virtud, si el modelador carece de gran parte de la información necesaria relativa a las relaciones causa-efecto del fenómeno en estudio, deberá considerar las características hidrológicas como eventos estocásticos. Si por el contrario, el modelador cuenta con bastante información de la relación causa-efecto, deberá considerar las características hidrológicas como consecuencias únicas de la situación.

El caso real entre estas dos posiciones contrastantes lo constituye el hecho de que frecuentemente se posee "alguna" noción de la relación causa-efecto de tal manera que no se está en una posición netamente estocástica. Sin embargo, tampoco se posee la totalidad de la información requerida como para someterse a lo riguroso del determinismo quedando entonces en la posición de la hidrología paramétrica.

## **MODELACIÓN DE PROCESOS EN CUENCAS POCO INSTRUMENTADAS**

En las últimas décadas ha existido una tendencia global en el uso de modelación de procesos hidrológicos para cuantificar la respuesta de las cuencas hidrológicas a estímulos climáticos, principalmente, precipitación pluvial, y para cuantificar la efectividad de las prácticas de manejo (Gitau *et al.*, 2010). Sin embargo, los modelos de simulación requieren de una calibración

robusta y de validación para estar en posibilidades de “garantizar” el adecuado comportamiento del modelo. Esto, solo es posible en cuencas instrumentadas. De esta manera, el uso de modelos de simulación de parámetros distribuidos pudiera ser usado para determinar la respuesta hidrológica de cuencas a estímulos climáticos previa calibración y validación en cuencas instrumentadas con características similares. Tal es el caso de los modelos WEAP (Water Evaluation and Planning System) y SWAT (Soil and Water Assessment Tool).

### Modelo WEAP

A través del tiempo, la gestión y suministro del recurso hídrico en muchas regiones del planeta son los principales problemas a los cuales se enfrenta la población; por factores de ubicación geográfica, calidad de agua, políticas de uso y administración del recurso, entre otras. Un instrumento que incorpora procedimientos prácticos para dicha planificación es el modelo WEAP (Water Evaluation Planning System) el cual fue desarrollado por el SEI (Stockholm Environment Institute). WEAP es una herramienta de modelación para la planificación y distribución de agua que puede ser aplicada a diferentes escalas, desde pequeñas zonas de captación hasta extensas cuencas, puede abordar análisis de demanda sectorial como sistemas urbanos, de tipo agrícola, modelación de presas para generación de energía eléctrica, calidad del agua, proyectos de análisis costo-beneficio de ecosistemas, entre otros (SEI, 2007).

Estas aplicaciones, dependen en gran medida de la disponibilidad de información para poder realizar los procesos de modelación en un área en específico. Para ello, a continuación se describen los procedimientos mínimos para su utilización, además de proporcionar fuentes de bases de datos, referencias, etc., que permitan realizar de manera más sencilla, el análisis o los estudios de simulación en México.

#### Presentación del modelo WEAP

Las secciones siguientes describen algunas de las herramientas básicas para realizar procesos de modelación de aguas superficiales utilizando WEAP, para ello en algunos apartados se estará haciendo referencia a una cuenca del sur del país como ejemplo.

## Descripción de la interfaz gráfica de WEAP

El modelo WEAP se considera una herramienta accesible con el usuario debido a la sencilla interfaz gráfica con la cual ha sido diseñado. En forma general se puede distinguir cuatro componentes principales: a) íconos de parametrización del modelo; b) elementos para la integración del esquema gráfico; c) sistemas de información geográfica (SIG) y d) área de visualización gráfica del esquema hidrológico (Figura 3).

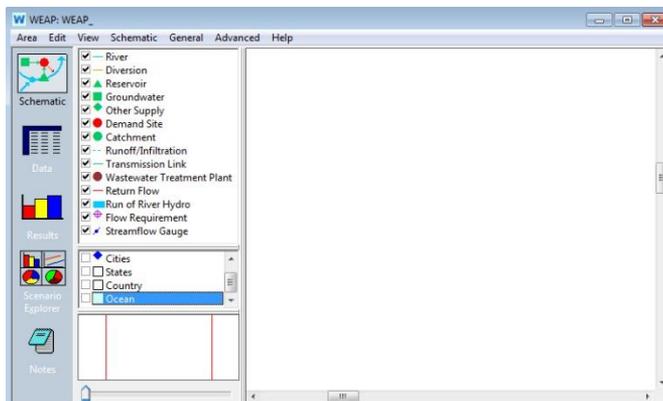


Figura 3. Ventana de inicio de WEAP.

- a) *Íconos de parametrización del modelo*: esta sección permite el desplazamiento dentro de las principales áreas de trabajo del modelo, visualizar el área gráfica, incorporación de la información, generación de los resultados, etc., cada vez que se utilice uno de los iconos principales, automáticamente se despliega en el área de visualización, inciso “d”.
- b) *Integración del esquema gráfico*: contiene iconos que permiten esquematizar el diagrama hidrológico dentro del modelo WEAP (ríos, reservorios, sitios de demanda, escorrentías, áreas de captación, etc.).
- c) *Sistemas de información geográfica*: WEAP permite la incorporación de sistemas de información geográfica vectorial (cuencas, ríos, estaciones climatológicas, hidrométricas, etc.) y raster con el objetivo de ayudar en la delimitación y distribución gráfica de la modelación, sin

embargo las capas adheridas no influyen en los procesos y/o resultados de modelación.

- d) *Área de diseño visualización gráfica*: esta área cambia conforme se active cada icono en la sección de parametrización del inciso “a”.

#### Creación de un área de trabajo en WEAP

Para crear un área de trabajo, ir al menú “Área”, elegir la primera opción “Create area” (Figura 4). Una forma abreviada de crear el área es presionando la tecla “Ctrl + N”.

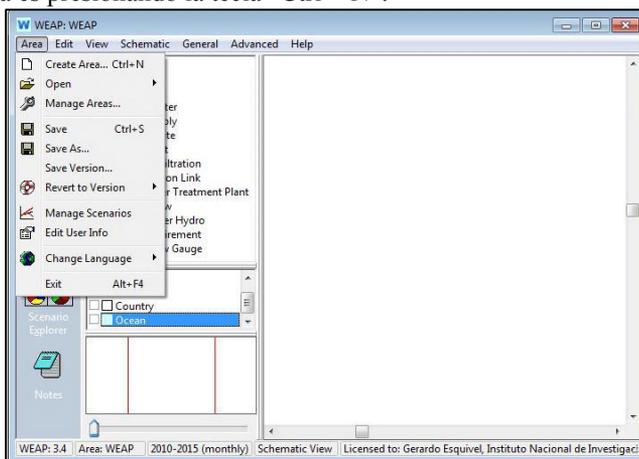


Figura 4. Creación de área de trabajo.

Desplegará una ventana en la cual deberá nombrar su proyecto y seleccionar la opción “Initially blank”, presionar “OK” (Figura 5).

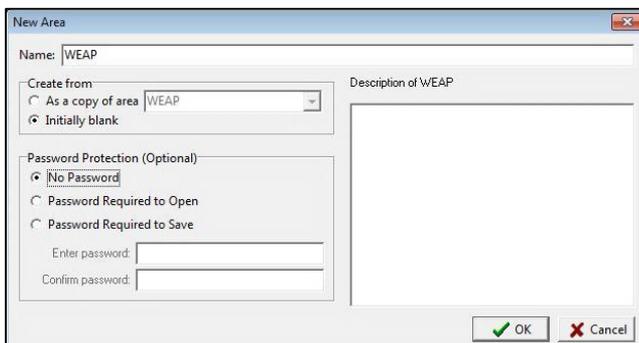


Figura 5. Nombrar el área de trabajo

El paso anterior desplegará una pantalla que le indicará que debe seleccionar el área de trabajo en WEAP, dar clic “OK”. En la pantalla generada, del lado izquierdo del diagrama presionar el botón izquierdo del mouse y definir un rectángulo (color rojo) sobre el mapa mundial. En esta ventana se puede utilizar la barra de “zoom” en la esquina inferior izquierda para aumentar la zona definida anterior. Automáticamente al mover el “zoom” el diagrama de la parte derecha le mostrará la parte que se selecciona con mayor detalle.

En este diagrama aparecerá un rectángulo (color verde), se puede crear un rectángulo más preciso de su área de interés, clic “OK” cuando se esté satisfecho con la zona seleccionada (Figura 6). Se puede redefinir si no está convencido con el acercamiento, usando la función “Set Area Boundaries” del menú “Schematic” en la barra de menú.

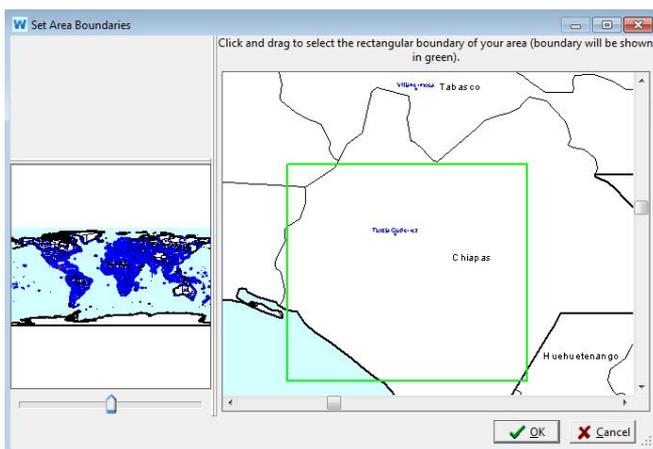


Figura 6. Selección del área de estudio

- **Agregar un estrato o capa SIG**

En el inciso “c” mencionado anteriormente, se pueden agregar capas de tipo vectorial o raster. Esto se realiza presionando el botón derecho del mouse, elegir “Add vector layer” o “Add raster layer” dependiendo de la naturaleza del archivo (Figura 7). Como recomendación, los archivos deben de estar en el sistema de

coordenadas geográficas WGS84 para que sean visualizados dentro de las capas precargadas de WEAP.

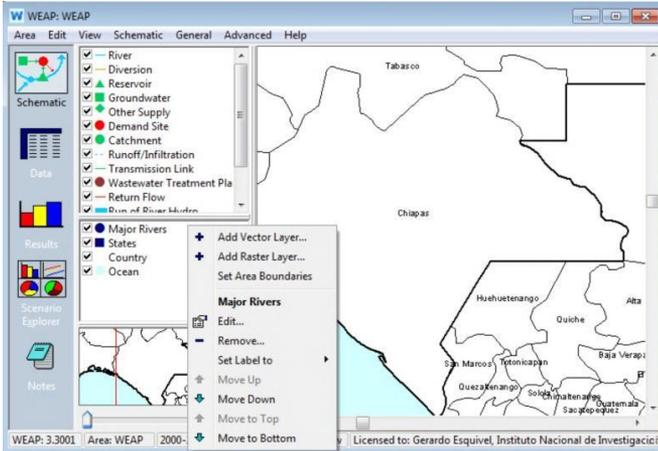


Figura 7. Agregando un archivo vectorial.

Ubica el archivo en el directorio correspondiente, dar clic en Abrir. Este paso mostrará otra ventana con el archivo seleccionado (Figura 8). Clic “Ok”.

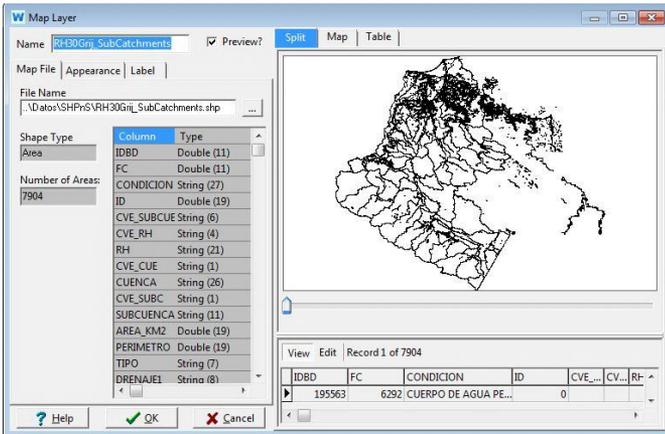


Figura 8. Visualización del archivo de tipo vectorial.

- **Guardando el proyecto de trabajo**

Para guardar el proyecto que se está trabajando, elegir “Area” del menú principal y seleccionar “Save” o presionar las teclas Ctrl + S simultáneamente (Figura 9).

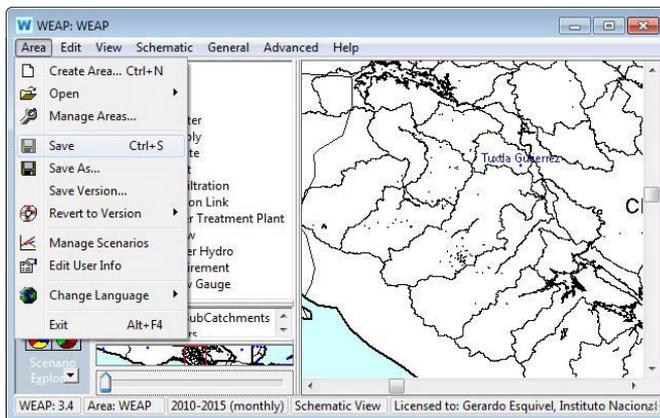


Figura 9. Guardar proyecto.

### Descripción de los parámetros de uso de suelo

En esta sección se incorporan las características físicas de las capas de suelo presentes en la cuenca, así como el tipo de cobertura, las siguientes sub secciones describen cada uno de los parámetros contenidos en esta opción.

- **Área**

Se especifica el área total de la cuenca en kilómetros cuadrados, además en este rubro se ingresan las categorías de uso de suelo y vegetación en porcentajes. Estas categorías dependen del período de años que se estén trabajando para la calibración, ya que determina la serie de vegetación a utilizar. Generalmente se recomienda utilizar un número completo de categorías sin llegar a ser extremadamente detallada, ya que la resolución del modelo no requiere una clasificación puntualizada de la cobertura vegetal. Si existiese información con muchas categorías se recomienda agruparlas en un grupo menor de categorías.

- **Kc**

El coeficiente de cultivo (Kc) es una relación proporcional o coeficiente de ajuste entre la **ET<sub>r</sub>** del cultivo y la **ET<sub>o</sub>**. Estos

coeficientes dependen fundamentalmente de las características propias de cada cultivo, por tanto, son específicos para cada uno de ellos. Aquí se especifica un  $K_c$  para cada tipo de cobertura (Allen *et al.*, 2006).

- **Capacidad de retención de humedad (*Soil water capacity, SWC*)**

Es la capacidad de retención de agua en la capa superior del suelo o zona de raíces, la cual está representada en milímetros (mm). Este valor es ignorado si el sitio de demanda tiene un flujo de retorno a un punto de aguas subterráneas.

- **Capacidad de retención profunda (*Deep water capacity, DWC*)**

Se refiere a la capacidad de retención de agua en la zona profunda o capa inferior del suelo, la cual está representada en mm. Tanto *soil water capacity* como *deep water capacity* se refieren al diagrama conceptual del modelo de doble “bucket” en WEAP (ver SEI, 2007).

- **Factor de resistencia al escurrimiento (*Runoff resistance factor, RRF*)**

Este parámetro es utilizado para controlar la respuesta al escurrimiento superficial, está relacionado con la cobertura vegetal y con la pendiente del terreno. Los valores van de 0.1 a 10. El escurrimiento tiende a disminuir conforme aumentan los valores de RRF.

- **Conductividad de la zona radical (*Root zone conductivity, RZC*)**

Es la tasa de conductividad hidráulica que se presenta en la zona radicular del estrato superficial del suelo (top bucket) a saturación (cuando el almacenamiento relativo de  $z_1 = 1.0$ ) el cual será dividido de acuerdo a la dirección de flujo preferente, entre el flujo e interflujo hacia las capas inferiores del suelo. Esta tasa puede variar entre los diferentes tipos de suelos.

- **Conductividad en la zona profunda (*Deep Conductivity, DC*)**

Es la tasa de conductividad hidráulica (longitud/tiempo) de la zona profunda o capa inferior de suelo (bottom bucket) a saturación (cuando el almacenamiento relativo de  $z1 = 1.0$ ), el cual controla la transmisión del flujo base. Esto es dado como un valor único para el sitio de captación y no varía por el tipo de suelo. El flujo base incrementa a medida que este parámetro aumenta.

- ***Dirección de flujo preferente (Preferred Flow Direction, PFD)***

Se refiere a la dirección preferencial de flujo: si  $0 = 100\%$  el flujo es vertical y cuando  $1 = 100\%$  indica flujo horizontal toda vez que el agua ha entrado al suelo. Se utiliza para dividir el flujo fuera de la capa de la zona radicular (top bucket) entre el flujo e interflujo hacia la capa inferior del suelo (bottom bucket) o a las aguas subterráneas. Este valor puede variar entre los diferentes tipos de suelo.

- ***Z1 Inicial (Initial Z1)***

Z1 es el almacenamiento relativo dado como un porcentaje del almacenamiento efectivo total de la capacidad de acumulación en la zona radicular. Es el valor inicial de Z1 al inicio de la simulación. Para añadirlo se deben seleccionar las unidades en porcentaje, e incluir el valor.

- ***Z2 Inicial (Initial Z2)***

Z2 es el almacenamiento relativo dado como un porcentaje del almacenamiento efectivo total de la capacidad de acumulación en la zona profunda o capa inferior de suelo (deep water capacity). Este parámetro es ignorado si el sitio de demanda tiene un flujo de escurrimiento/infiltración a un punto de aguas subterráneas. Esta tasa puede variar entre diferentes tipos de suelo. Es el valor de Z2 al inicio de la simulación. Para añadirlo se deben seleccionar las unidades en porcentaje, e incluir el valor.

### Descripción de los parámetros de clima

Se incorporan los parámetros climáticos propios de la cuenca, en este caso WEAP presenta diversos elementos a incorporar dependiendo del tipo de modelación a realizar, en seguida se muestran los elementos mínimos a ser ingresados.

- **Precipitación (*Precipitation*)**

Se refiere a la base de datos que contenga los promedios mensuales históricos de precipitación de la estación climatológica ubicada en el sitio de estudio.

- **Temperatura (*Temperature*)**

Se refiere a la base de datos que contenga los promedios mensuales históricos de temperatura de la estación climatológica ubicada en el sitio de estudio.

- **Humedad Relativa (*Humidity*)**

Es el promedio mensual de la humedad relativa, dependiendo de la región de análisis se puede establecer un aproximado anual del valor de este parámetro. Si se tienen los valores mensuales utilizar “Monthly Time-Series Wizard”.

- **Viento (*Wind*)**

Es el promedio mensual de la velocidad del viento, las unidades se deben expresar en m/segundo o km/h. Si se tienen los valores mensuales utilizar “Monthly Time-Series Wizard”

- **Nubosidad (*Cloudiness fraction*)**

Se refiere a la cantidad de horas durante el día que se presenta la nubosidad, 0.0 indica completamente nublado y 1.0 indica cielo despejado. Si no existe información al respecto y el valor se deja en blanco, WEAP automáticamente lo detecta como cielo despejado (1.0). Tanto la humedad relativa, viento y nubosidad, pueden ser valores aproximados.

- **Latitud**

Es la latitud del sitio en grados decimales, el cual va de -90 a 90 grados.

- **Hidrometría**

Se refiere a la base de datos de la estación de las estaciones de aforo presentes en la cuenca, la cual debe de estar en forma mensual.

### Generar suposiciones clave (Key assumptions)

Las “key assumptions” constituyen una de las herramientas básicas en WEAP. Estas se utilizan, generalmente, cuando se tienen muchos sitios de captación o el modelo que se analiza requiere ingresar la misma información en diferentes partes del modelo.

Como ejemplo, para crear este tipo de “key assumptions”, presionar el símbolo “Data” y elegir la opción “Key Assumption” localizado en el árbol de opciones, presionar el botón derecho del mouse y elegir “+Add”. Aparecerá un nuevo elemento al cual se debe nombrar de acuerdo al parámetro que desee incorporar al modelo (Figura 10) teclear Kc.

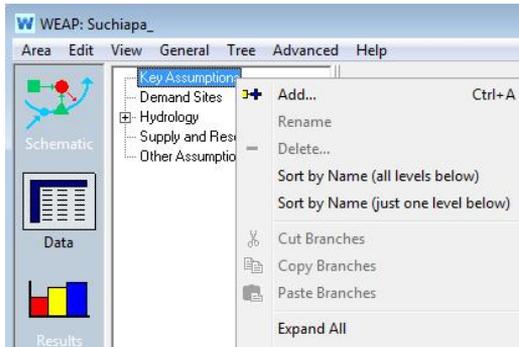


Figura 10. Creación de una suposición clave.

Nuevamente seleccionar Kc, dar clic derecho y seleccionar +Add, el elemento generado se denominará Pastizal cultivado, activarlo y en barra de desplazamiento frente a Pastizal cultivado seleccionar “Monthly Time-Series Wizard” (Figura 11). En la ventana que despliega agregar los valores mensuales (de Junio a Enero = 1; Febrero a Marzo = 0.6), clic en Finish (Figura 12).

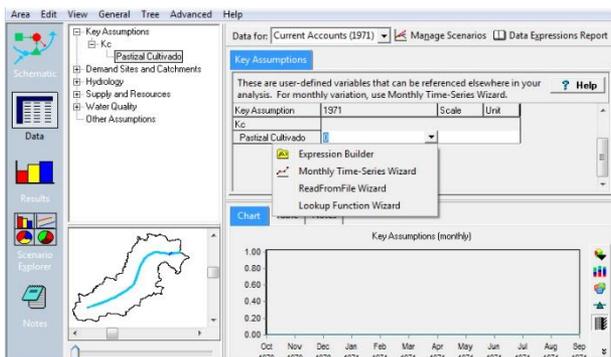


Figura 11. Monthly Time-Series Wizard

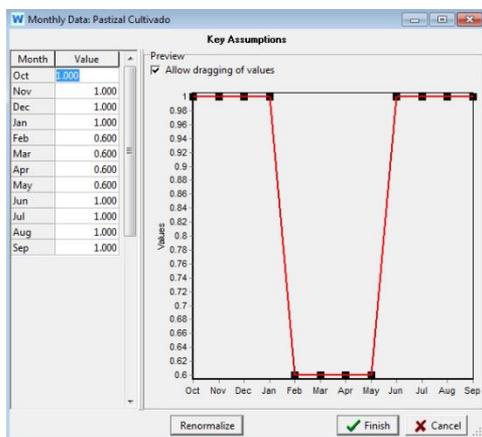


Figura 12. Valores mensuales de Kc

Una vez realizado las “key assumptions”, se debe crear en la cuenca de estudio o catchment una opción que se denomine pastizal cultivado, al cual se le asignarán los valores creados en la Figura 12 (Figura 13).

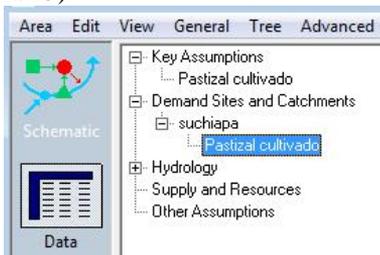


Figura 13. Creación de key assumptions en el sitio de captación.

Una vez creado “pastizal cultivado” en la pestaña Kc en el sitio de captación, se presiona la flecha de desplazamiento y se elegi la opción “Expression builder” (Figura 14).

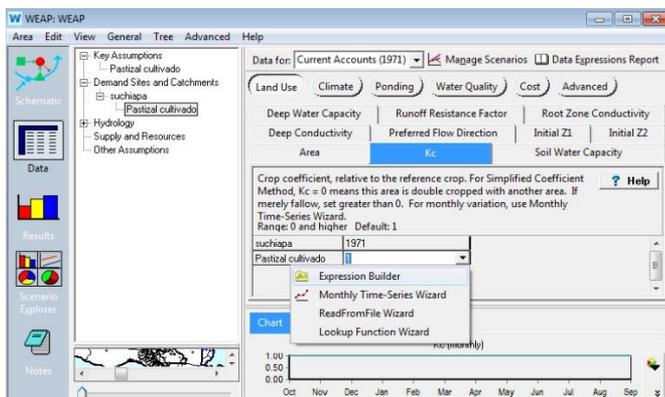


Figura 14. Editor de ecuaciones en WEAP

Desplegará una ventana en la cual, en la parte inferior derecha aparecen dos pestañas, “Functions” y “Branches”, clic en branches. Desplegará el árbol de opciones que se tienen tanto para las key assumptions como en la cuenca (Figura 15).

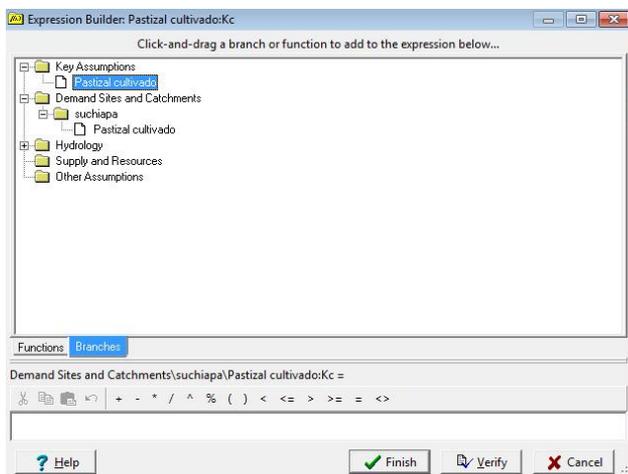


Figura 15. Árbol de opciones de los elementos del modelo

Para agregar los valores de pastizal cultivado al sitio de captación, solamente arrastre el “key assumptions” creado y colóquelo en el recuadro en blanco que aparece en la parte inferior de la pantalla, automáticamente debe de aparecer la expresión completa. Clic en Verify. Si la acción es correcta, dar clic en Ok y posteriormente en Finish. Los valores han sido copiados sin necesidad de teclear nuevamente los valores (Figura 16).

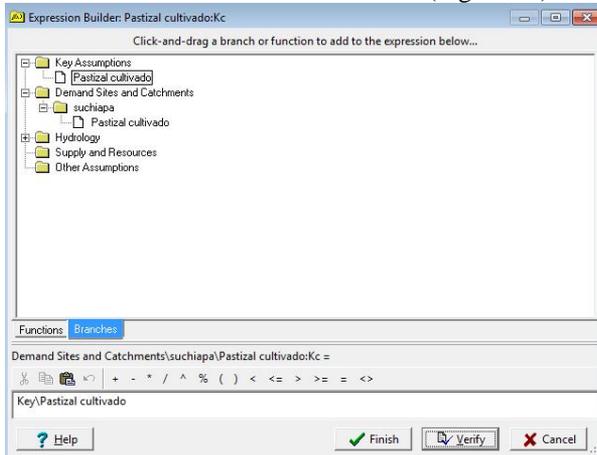


Figura 16. Creación del key assumptions en el parámetro Kc

### Introducción de elementos al esquema

Para seguir este ejercicio, deberá crear un área en blanco y determinar su área de estudio que abarque el estado de Chiapas, utilizando las capas precargadas en WEAP.

Para comenzar, se establece el periodo de calibración. Una vez abierto el programa, en el menú principal elegir “General”, seleccionar, “Years and Time Steps”, y las unidades, “Units”, (Figura 17). Se modelará a partir del año de 1971-1990 iniciando en el mes de Octubre.

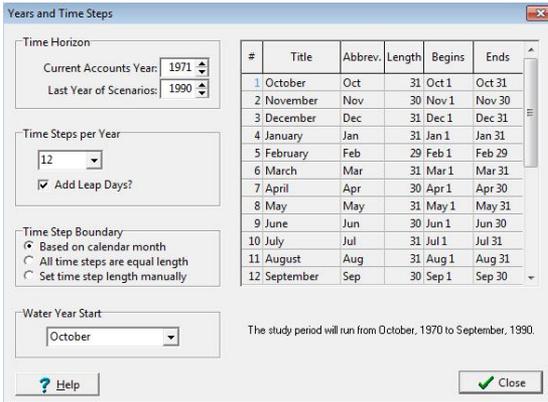
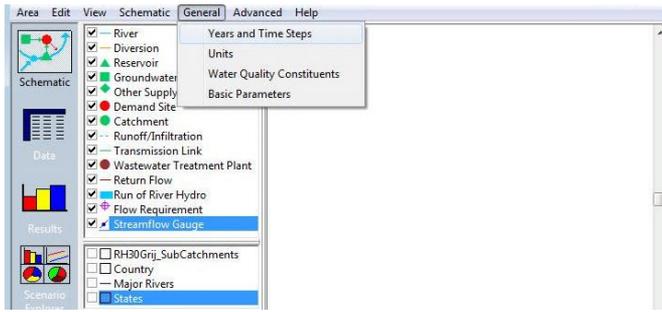


Figura 17. Selección del período de calibración.

- **Incorporando un río**

A partir de este apartado, se recurre a una cuenca ejemplo llamada Suchiapa, la cual se encuentra ubicada en el estado de Chiapas.

Incorporar el polígono de la cuenca, como se explicó anteriormente. En la pantalla principal, dar clic al área esquemática que contiene diferentes figuras. Para representar un río\*, elegir la opción “River”, dar clic en esta opción y de nuevo con el botón izquierdo mantener presionado, arrastrar el cursor hasta el comienzo del río y cuando esté en ese punto soltar el botón.

---

\* La dirección del trazado de río si tienen importancia en WEAP. El primer punto será el inicio del río o su nacimiento.

Se mueve el cursor siguiendo la parte central de la cuenca y finalice en la parte superior del polígono. Se notará que una línea se va creando desde el cursor; para finalizar este procedimiento hacer doble clic en el botón izquierdo (Figura 18). Al dar doble clic aparecerá una ventana en donde se ingresa el nombre del río que ha sido trazado, y al presionar “Finish” lo desplegará. Si se desea eliminar el trazo, presione el botón derecho del mouse con el cursor sobre cualquier parte del río y elija “delete”. Si se desea editar el trazo, seleccionar un punto sobre el río y mover el cursor en donde se quiere cambiar su orientación.

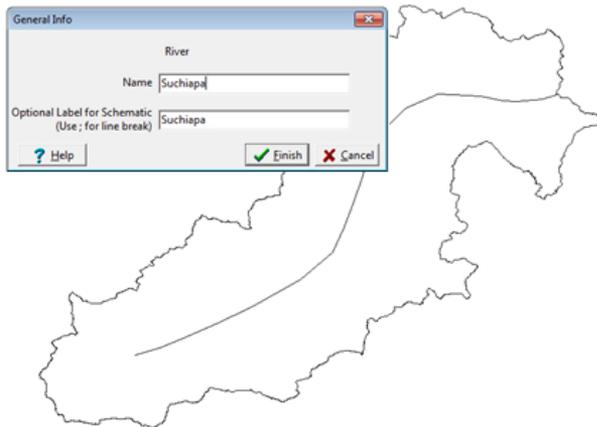


Figura 18. Incorporando un río.

- **Añadiendo un sitio de captación o catchment**

Un sitio de captación dentro de la cuenca es un área definida por el usuario dentro del diagrama esquemático en WEAP. Para introducir un área de captación, se realiza el procedimiento similar que con el trazado del río, pero en este caso seleccionaremos el elemento “catchment”.

El botón izquierdo del mouse, mantener presionado, arrastrar el cursor hasta donde se colocará el sitio, y soltar el botón. Automáticamente se despliega una ventana (Figura 19) en donde se deberá ingresar el nombre, en la opción “Runoff to” ubicar el río correspondiente “Suchiapa”. Al elegir el río, activar la opción “Represents Headflow”, presionar, “Finish”, y automáticamente se generará una flecha indicando el flujo del sitio hacia el río. Al seleccionar, “Headflow”, se asume que el escurrimiento se inicia en la parte alta del río.

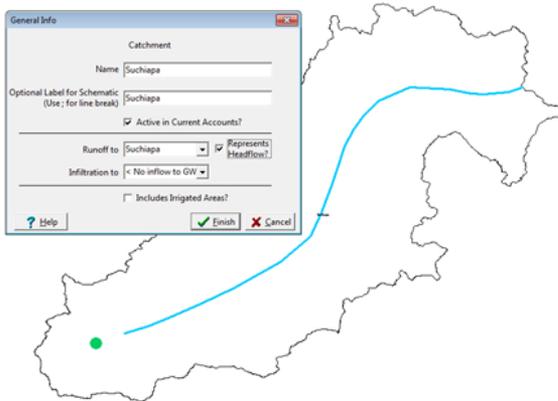


Figura 19. Creación de un sitio de captación.

- **Incorporando un sitio de aforo**

Para introducir una estación de aforo, seleccionar “Streamflow Gauge”, mantener presionado el botón izquierdo del mouse, y arrastrar el cursor hasta el sitio en donde se colocará la estación de aforo, y soltar el botón (Figura 20). Automáticamente se desplegará una ventana en la cual se introduce el nombre de la estación de aforo “Boquerón”; dar clic “Finish”.

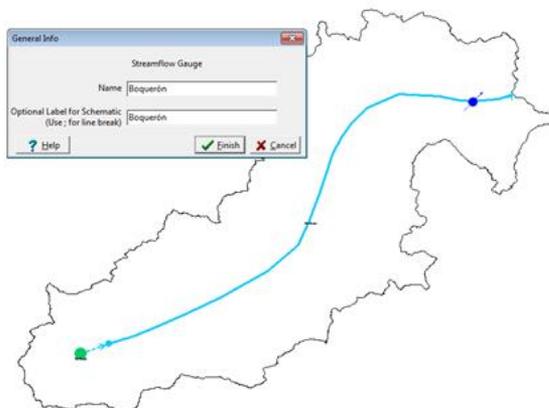


Figura 20. Creación de un sitio de aforo.

- **Selección del método de cálculo de escurrimiento**

Para editar o ingresar datos a un elemento en el diagrama de trabajo, existen dos métodos. El primer método es presionar el botón derecho del mouse estando sobre el esquema (p.ej. catchment), elegir “Edit Data” y escoger cualquier función dentro de la lista (Figura 21). El segundo método es ir a la columna de herramientas de la izquierda y presionar sobre el símbolo, “Data”.

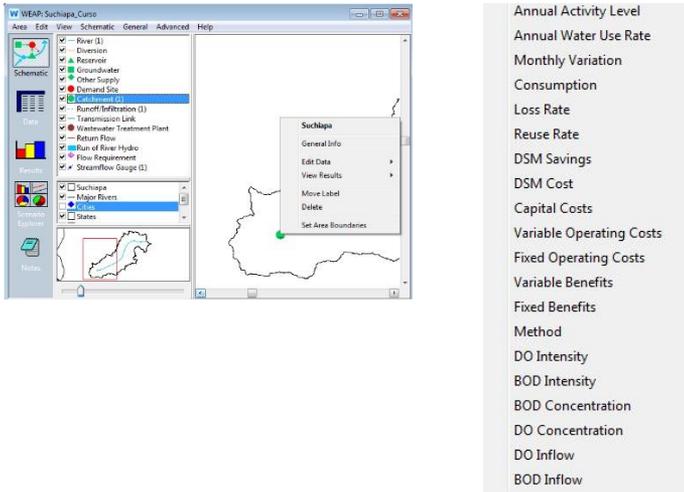


Figura 21. Agregar información al esquema.

De las opciones que se muestran en la pantalla seleccionar el método “Rainfall Runoff (Soil moisture method) (Figura 22).

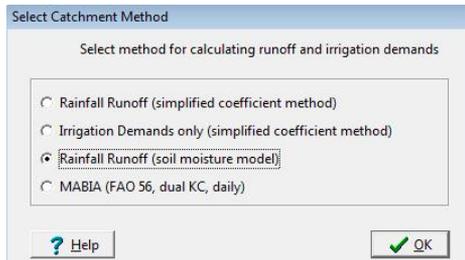


Figura 22. Selección del modelo de escurrimiento.

Una vez seleccionado el modelo, aparecerán una serie de pestañas en las cuales se deberá ingresar la información que se requiera para poblarlo (Figura 23). La ubicación del sitio de captación estará en la opción, “Demand Sites and Catchments”, y

para el caso del río seleccionar, “Supply and Resources” del árbol de opciones que aparecerá, elegir, “river”, y seleccionar el nombre asignado al río. Para abrir y cerrar los esquemas se debe presionar sobre el símbolo.

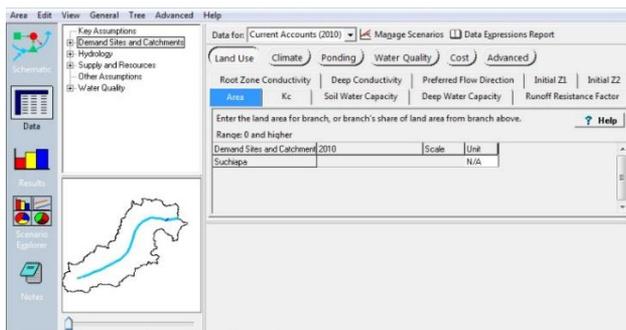


Figura 23. Opciones del método de escurrimiento.

- **Incorporando información a los parámetros del modelo**

Las siguientes secciones indican cómo incorporar la información en cada apartado del modelo, específicamente en los rubros de uso de suelo, clima y las estaciones hidrométricas.

- **Uso de suelo**

Se inicia con el cálculo del área de la cuenca y los porcentajes que ocupa cada uno de los parámetros de uso de suelo y vegetación. El cálculo de estos valores se realiza en un sistema de información geográfica con que se cuente. Los siguientes pasos muestran el cálculo para la subcuenca Suchiapa, en el estado de Chiapas, con la herramienta ArcGis v. 9.3.

En el sistema de información geográfica, una vez proyectada la capa de vegetación de la cuenca, dar clic con el botón derecho sobre el “shape” y elegir “open Attribute Table”. Se desplegará una ventana con la información contenida en el archivo (Figura 24).

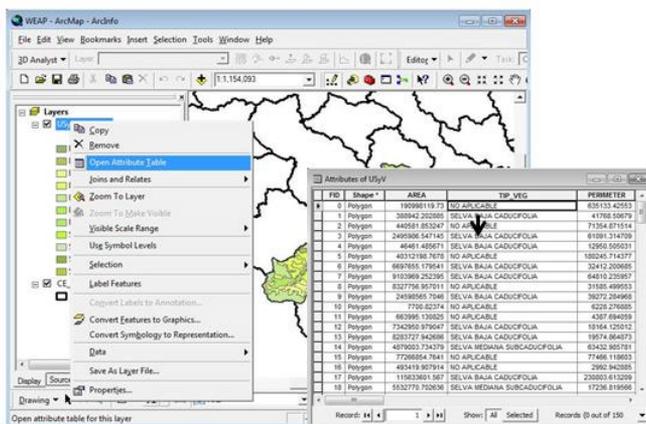


Figura 24. Tabla de atributos de la capa de vegetación.

Como se puede apreciar en la figura anterior, en la cuarta columna aparece el tipo de vegetación (Figura 24). Para clasificarlos en un solo tipo, dar clic con el botón derecho sobre el encabezado de la columna, elegir “Sort ascending”, automáticamente agrupará los tipos de vegetación en orden alfabético.

Colocar el cursor en la primera fila en la parte superior izquierda y deslizar el mouse hacia abajo hasta seleccionar los campos de un solo tipo de vegetación. Clic con el botón derecho sobre el encabezado Área, y elegir “Statistics”. El resultado arroja los parámetros estadísticos de los campos seleccionados (Figura 25).

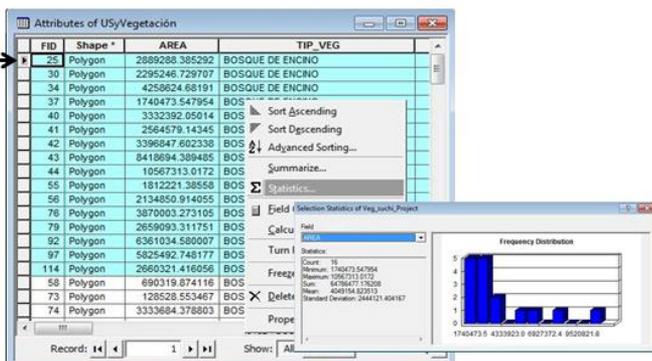


Figura 25. Cálculo de áreas por tipo de vegetación en ArcGIS

En este caso, se obtiene la suma total de los polígonos que contienen ese tipo de vegetación y el porcentaje respecto al valor de área total de la cuenca. Una vez que se tienen los porcentajes de cada tipo de vegetación de la cuenca se incorporan al modelo.

- **Área**

Se activa la pestaña “Land Use” y se elige la opción “Area”, automáticamente aparece el sitio de captación y se debe de elegir las unidades. Dar clic en la flecha inferior de la opción Unit, elegir Area, Kilómetros cuadrados, y presionar OK (Figura 26). En este caso se agrega el área total de la cuenca en Km<sup>2</sup>.

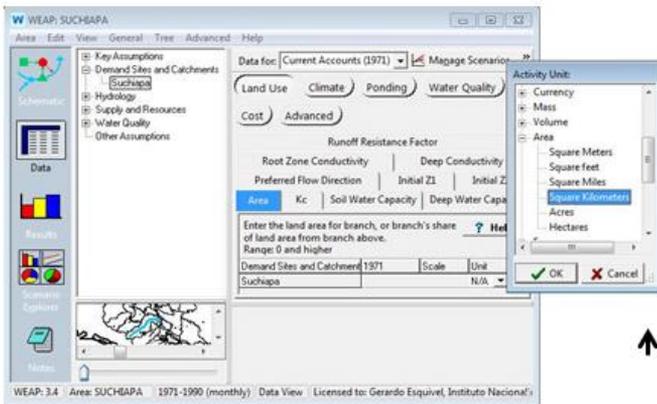


Figura 26. Ingresando el área de la cuenca.

Para agregar cada tipo de vegetación contenido en el sitio de captación, en el árbol de opciones de la parte superior derecha de la pantalla seleccionar “Demand Sites and catchments”, y posteriormente, “Suchiapa”. Clic en el botón derecho, y elegir la primera opción, “+ Add”, y teclear el nombre del tipo de cobertura p ej. “Ag Temporal”, esta acción permite agregar una rama al árbol de elementos de esquema del sitio de captación.

Para que aparezca la opción de porcentaje en el tipo de vegetación, seleccionar “share”, en vez de área. El mismo procedimiento se hace para todos los tipos de vegetación que se agregarán.

Para evitar problemas de redondeo con los porcentajes en cada tipo de cobertura hay una opción, en lugar de teclear el valor,

se escribe *Remainder(100)*, esta acción indica que el resto de los valores porcentuales serán dirigidos a este tipo de cobertura (Figura 27).

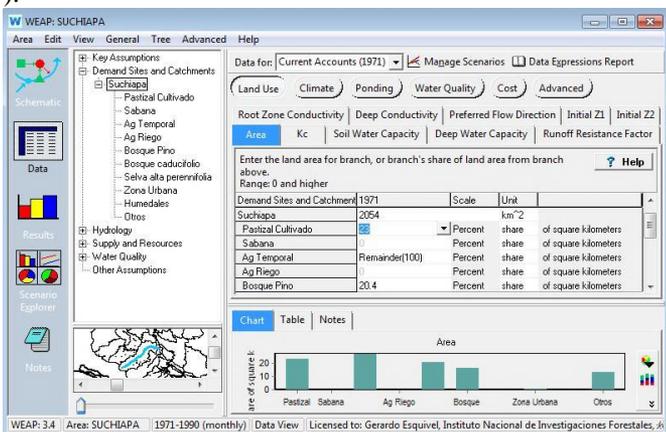


Figura 27. Definiendo porcentajes de cobertura.

○ **Kc**

La forma de agregar los kc en WEAP se menciona a continuación. Seleccionar la pestaña kc, aparecerán los tipos de cobertura que presenta Suchiapa, dar clic en la flecha de desplazamiento que aparece frente al primer tipo de cobertura y elegir “Monthly Time-Series Wizard”. Al seleccionar la opción arrojará una ventana en la cual se debe de teclear el valor de kc para cada tipo de cobertura, esto se hace de manera mensual, cada valor se mostrará en una gráfica (Figura 28).

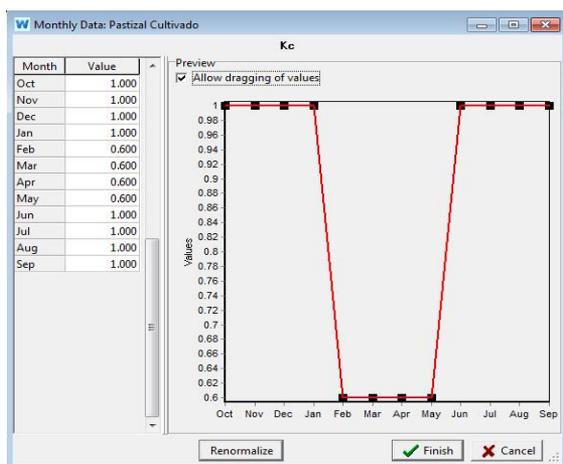


Figura 28. Ventana para ingresar los datos de kc.

○ **Soil water capacity**

Para agregar la capacidad de retención de agua se eligen las unidades en “mm” y se tecldea directamente el valor en cada tipo de cobertura (Figura 29). El mismo procedimiento se realiza para las siguientes opciones mencionadas en la sección 2.2

Capacidad de retención profunda (Deep water capacity)

Factor de resistencia al escurrimiento (Runoff resistance factor)

Conductividad de la zona radical (Root zone conductivity)

Conductividad en la zona profunda (Deep Conductivity)

†Dirección de flujo preferente (Preferred Flow Direction)

<sup>2</sup>Z1 Inicial (Initial Z1)

<sup>2</sup>Z2 Inicial (Initial Z2)

---

† El valor es en porcentaje

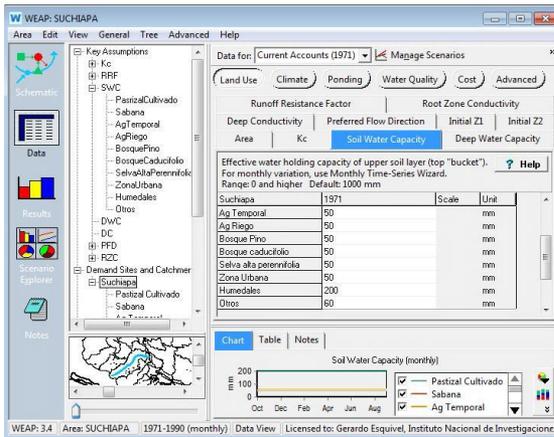


Figura 29. Ventana para ingresar los valores de soil water capacity.

### ○ **Clima**

La información climatológica del sitio de captación o del área de estudio es fundamental para alimentar el modelo, la cual debe de ser procesada para formar una serie de archivos que permita el uso de los datos dentro de WEAP. A continuación se presenta una breve descripción del formato que debe contener los archivos.

### ○ **Precipitación**

El análisis inicia con el inventario de estaciones climatológicas presentes en cada cuenca o área de análisis. En seguida se mencionan dos maneras de saber la ubicación de las estaciones climatológicas:

- 1) Crear un archivo con extensión “\*.kml” en un sistema de información geográfica de las estaciones climatológicas y un archivo que contenga la división de las cuencas en el país y proyectarlas en Google Earth, esta herramienta permite visualizar la ubicación correcta en el territorio nacional.
- 2) Visualizar el Simulador de Flujo de Aguas Superficiales del INEGI, de las capas precargadas seleccionar la cuenca de interés y además la capa de estaciones climatológicas, de esta manera se podrá apreciar si existen estaciones climatológicas en el área de interés (Figura 30).

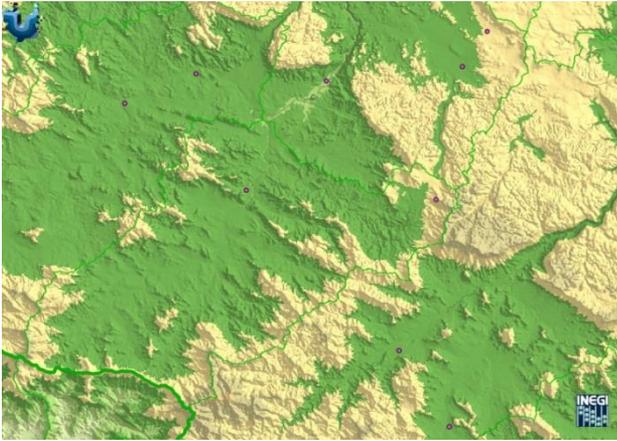


Figura 30. Simulador de flujos del INEGI ([http://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/SIATL/#](http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/#)).

Una vez identificadas las estaciones se debe de realizar un análisis para determinar la extensión en años y la cantidad de información existente. A partir de este análisis, puede ayudar en determinar el período de modelación para la calibración, ya que además de temperatura y precipitación, la información de las estaciones hidrométricas debe de corresponder al mismo período de evaluación.

En general, dependiendo de la disponibilidad de información climática, se recomienda utilizar un periodo de calibración que sea lo suficientemente largo como para representar la variabilidad climática. Si la información en los años de registros es escasa, se puede acudir a herramientas que ayuden a generar información faltante.

Para que la información sea leída en WEAP se debe de trabajar en Microsoft Excel, para ello se debe de registrar en tres columnas (año, mes, valor) y la información debe de estar contenida de manera mensual como se puede apreciar en la Figura 31. Guardar como archivo delimitado por comas, con la extensión “\*.csv”. Si hacen hincapié en la primer columna, se puede observar que el encabezado presenta un símbolo de “punto y coma” esta instrucción hace que WEAP no lea la primera fila, sino que lea directamente los valores contenidos en el archivo.

	A	B	C	D
1	.yy	mes	Pp	
14	1971	1	0	
15	1971	2	0	
16	1971	3	2.3	
17	1971	4	0	
18	1971	5	34.5	
19	1971	6	257.6	
20	1971	7	194.1	
21	1971	8	232.9	
22	1971	9	324	
23	1971	10	121.5	
24	1971	11	16.5	
25	1971	12	0	
26	1972	1	3.4	
27	1972	2	0	
28	1972	3	0	
29	1972	4	5.7	
30	1972	5	28.2	
31	1972	6	199.4	
32	1972	7	237.3	
33	1972	8	83.9	
34	1972	9	61.2	
35	1972	10	10	
36	1972	11	45.4	
37	1972	12	5.9	
38	1973	1	0	
39	1973	2	0	

Figura 31. Formato en Microsoft Excel para los datos climáticos.

○ **Temperatura**

El procesamiento de datos de temperatura es similar al procedimiento de la precipitación. Generalmente, el período de información contenido en las estaciones tanto de temperatura como de precipitación es el mismo, por lo cual no existe mucha diferencia en cuanto al procedimiento de análisis.

El procedimiento para precargar los archivos en WEAP se puede realizar de dos maneras:

a) estando en el menú “Clima” seleccionar precipitación y se activará la cuenca en estudio; para ello se debe de configurar las unidades en “mm” para esta variable, posteriormente presionar la flecha de desplazamiento que está frente al nombre de la cuenca. Desplegará 4 opciones, elegir “Expression Builder” (Figura 32).

En la parte derecha de la ventana que despliega, elegir la opción, “Read from File”, y dar doble clic, lo mostrará en la parte inferior. En el paréntesis se indicará el directorio en el cual está localizado el archivo con la información de precipitación, después del nombre de la carpeta localizada en WEAP Areas (Figura 33). Como se puede notar se debe de teclear la extensión del archivo “\*.csv” para que WEAP pueda reconocer la expresión, presionar “Verify” para corroborar que la expresión haya sido escrita correctamente, de ser así desplegará un mensaje de “OK” indicando

el procedimiento correcto. Presionar “Finish” y automáticamente mostrará en forma gráfica la distribución de la precipitación.

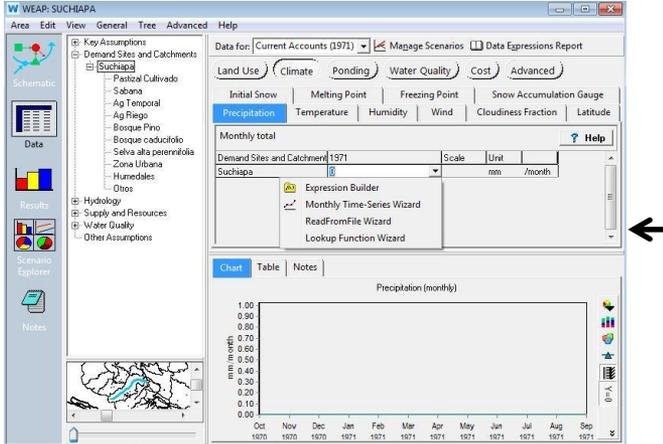


Figura 32. Ventana de “Expression Builder”.

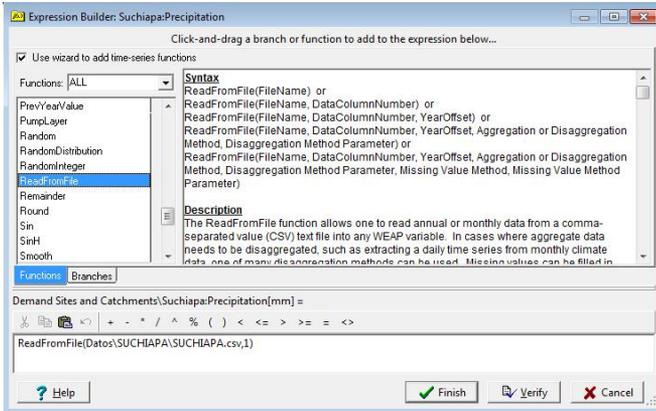


Figura 33. Creación de la expresión del archivo de precipitación.

b) la segunda manera es similar a la del inciso “a”, pero en vez de seleccionar “Expression Builder”, elegir, “ReadFromFile Wizard”, esta opción permite navegar hasta la ubicación del archivo con la información (Figura 34).

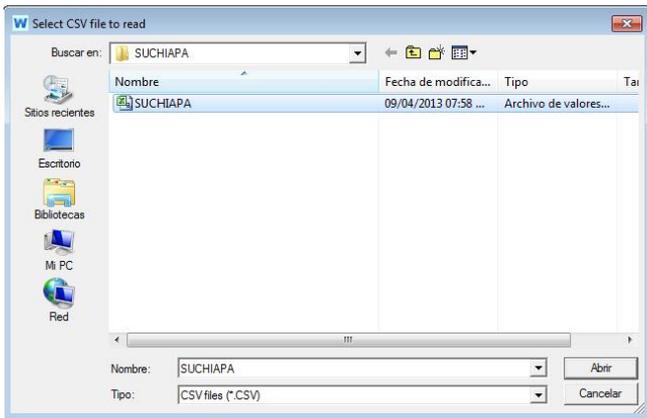


Figura 34. Selección de archivos utilizando el asistente de lectura de archivos.

En el directorio, seleccionar y clic en abrir, desplegará la información contenida en el archivo (Figura 35), en la parte superior izquierda le indica el número de columnas de información, si el archivo tuviera más de una columna, puede seleccionar la adecuada al modelo. En la parte superior derecha aparece la información de forma gráfica a escala anual y en la parte inferior a escala mensual histórica, esto ayuda a corroborar la calidad de la información en el archivo. Clic Finish.

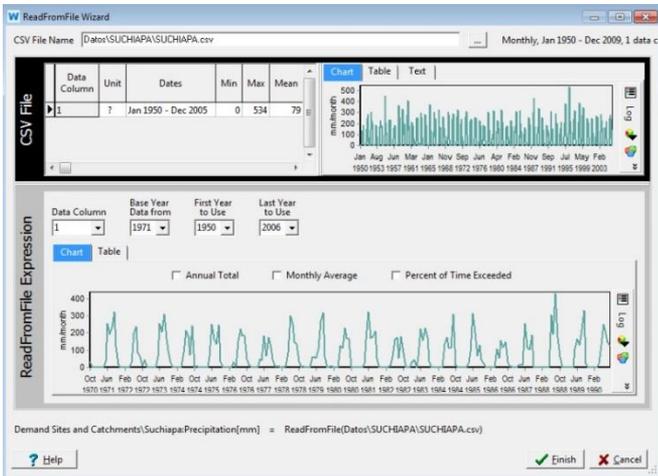


Figura 35. Selección de archivos utilizando el asistente.

## Hidrometría

Para identificar las estaciones hidrométricas localizadas en el área de interés, una de las herramientas disponibles y de rápido acceso es el simulador de aguas superficiales del INEGI, en vez de activar la capa de estaciones climatológicas mencionada anteriormente, se activa la capa de estaciones hidrométricas.

Una vez identificadas por su clave, se puede descargar de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), esta dependencia a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) presenta el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) que integra la red hidrométrica nacional (ver fuentes de datos Cap. 2.) (Figura 36).



### **Subdirección General Técnica (SGT)**

**Gerencia de Aguas Superficiales e Ingeniería de Ríos (GASIR)**

**Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales  
(BANDAS)**

Figura 36. Vista de la pantalla de base de datos del BANDAS.

En este sitio de internet, se tiene el inventario de las estaciones hidrométricas del país, las fichas correspondientes y las bases de datos de cada estación. Teniendo la clave de la estación hidrométrica se descargan los archivos, los cuales están en formato Microsoft Acces.

Una vez abierto el archivo, se generará al lado derecho una serie de hojas de información denotadas por claves (Figura 37). Para acceder a los parámetros necesarios en WEAP dar doble clic en la clave "DM" el valor que le sigue a esta secuencia se refiere al número de la estación hidrométrica.

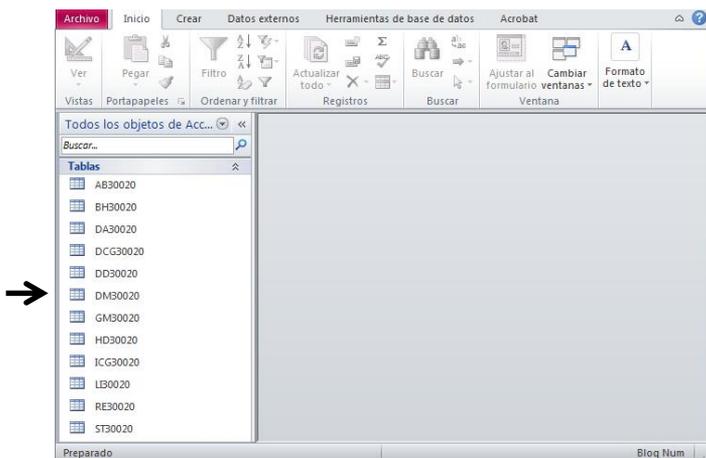


Figura 37. Vista de la pantalla inicial del archivo en formato Access.

Al dar doble clic generará una pantalla con la información contenida de los aforos correspondientes a esta estación. Como se puede observar, la primera columna se refiere al año, y la segunda al mes, tal y como se necesita tener para ser ingresados en WEAP (Figura 38). Para ello la columna 1 (año), 2 (mes) y la columna 18 (gasto), se deben de copiar y pegar en un archivo Excel, y guardarlos nuevamente como archivo delimitado por comas (\*.csv).

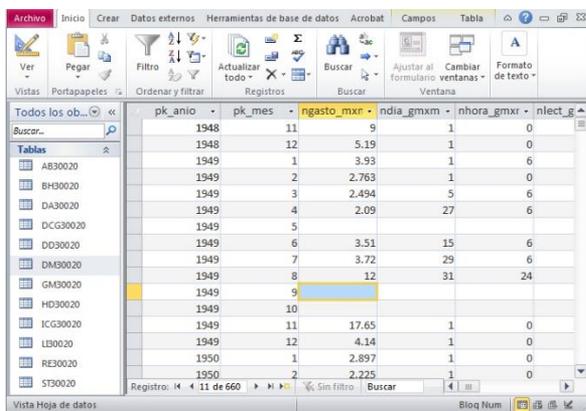


Figura 38. Vista de la pantalla con los datos de aforo.

- **Estación de aforo**

Para incorporar la información de aforo que se obtuvo de los archivos bandas, dar clic en “Data”, del árbol de opciones, elegir Supply and Resources, River, Streamflow Gauges y finalmente el nombre de la estación de aforo (Figura 39). Para incorporar el archivo, se realiza el mismo procedimiento realizado con la temperatura y precipitación, con el método que más se le facilite, una vez subido el archivo mostrará la distribución en forma gráfica (Figura 40).



Figura 39. Diagrama para ubicar la estación de aforo.

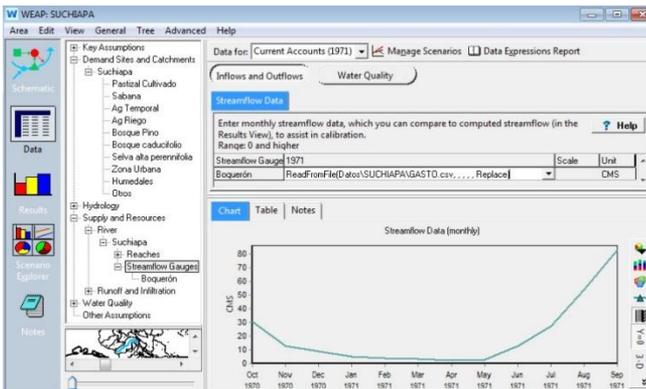


Figura 40. Ventana con los aforos distribuidos en WEAP.

## Primeros resultados

Hasta este momento ya se pueden realizar los primeros cálculos de la modelación en WEAP. Clic al lado derecho de WEAP en la opción Results, le preguntará si está de acuerdo en calcular los datos, clic en Ok. Se generará un recuadro mostrando el porcentaje de avance de la ejecución (Figura 41) en caso de existir algún error en la captura de información, WEAP le muestra el tipo de error por lo que se tendría que revisar de nuevo la información incorporada.

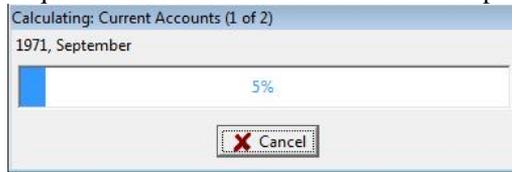


Figura 41. Porcentaje de ejecución del modelo.

Al finalizar la ejecución de WEAP, para poder visualizar los resultados de lo observado vs. calculado por WEAP, en la parte superior de la pantalla, seleccionar la flecha de desplazamiento y ubicar Supply and Resources, River y Streamflow (Figura 42). Al realizar esta operación se mostrarán los valores observados como calculados por WEAP. Si la calibración la considera satisfactoria entonces la hidrología de su cuenca se estará modelando apropiadamente (Figura 43 y 44), si no está conforme con su calibración debe revisar los parámetros de entrada y verificar que los valores de entrada hayan sido los correctos.

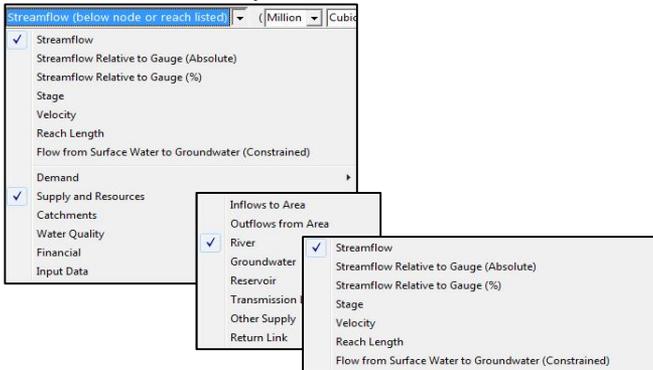


Figura 42. Ruta de visualización de resultados.

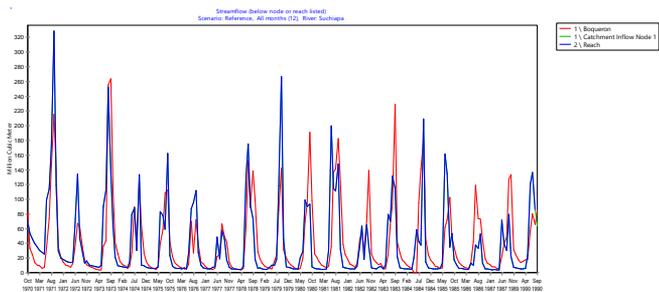


Figura 43. Resultados observados vs. modelados por WEAP.

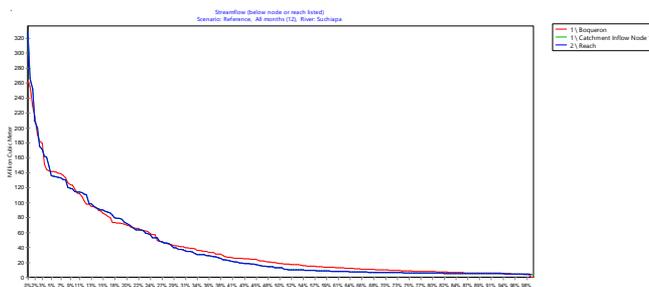


Figura 44. Resultados observados vs. modelados por WEAP.  
Estableciendo sitios de demanda

Una vez realizados la ejecución de los primeros resultados, agregar sitios de demanda, en este ejemplo, serán uno de carácter agrícola y uno urbano. Para crearlo, dar clic en “Schematic”, elegir, “demand site”. Presionar con el botón izquierdo y mantener presionado y soltar a un lado de la parte baja del río. Se desplegará el mensaje para nombrar el nodo, teclear, “ciudad” (Figura 45).

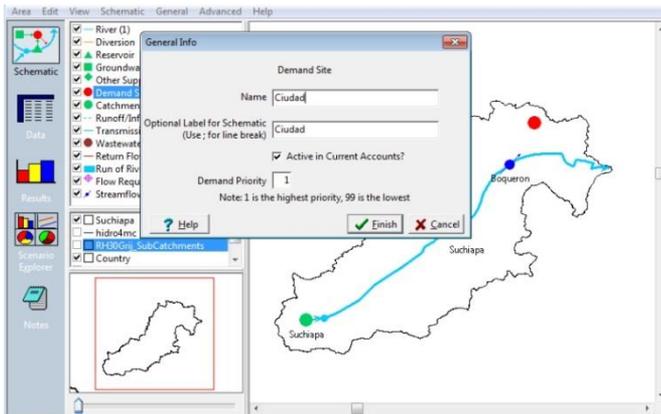


Figura 45. Creando un sitio de demanda urbano.

Para agregar los datos al sitio de demanda, dar clic sobre el nodo con el botón derecho, “Edit data”, y seleccionar “Annual activity level”. Primeramente se deben seleccionar las unidades correspondientes, ir a “Annual activity level” elegir, “unit”. Clic en N/A, elegir “people” de las opciones que se despliegan, clic OK (Figura 46). Teclear la población, por ejemplo, “80000”.

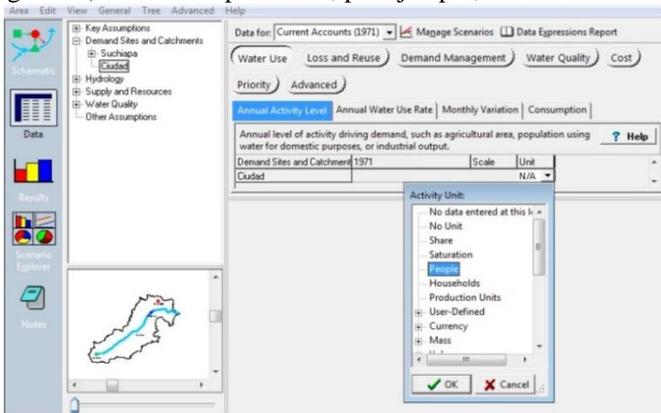


Figura 46. Selección de unidades apropiadas.

Presionar la pestaña “Annual water use rate”, ingresar la cantidad. Finalmente presionar la pestaña “Consumption”; ingresar el valor de 15. Las unidades deben de ser en porcentajes, unidad que esta por default (Figura 47).

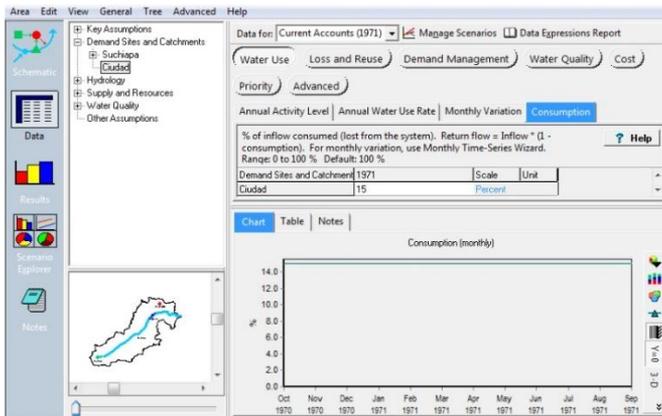


Figura 47. Ingreso del consumo en porcentaje.

Ahora se agregará un nodo de demanda agrícola. Nuevamente en la opción “Schematic” seleccionar “Demand Site”, arrastrar el cursor presionando el botón izquierdo, mantener presionado y soltar a un lado de la parte baja del río, contrario a la “Ciudad”. Desplegará el mensaje para nombrar el nodo, teclear “Agricultura” (Figura 48).

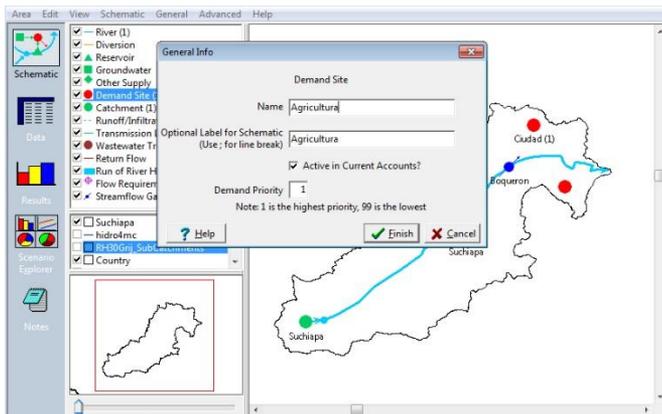


Figura 48. Ingreso de un sitio de demanda agrícola.

De igual forma que para “Ciudad”, ingresar los datos en “Annual activity level, anual water use rate”, en este caso en la opción “anual activity level” en “unit”, elegir área y posteriormente “hectáreas (Figura 49).

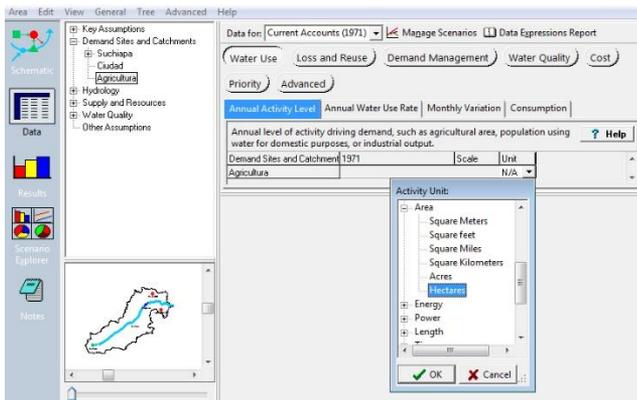


Figura 49. Selección de hectáreas para el nodo agricultura.

Ingresar los valores para “annual activity level” = 100000, y en “annual water use rate” = 2500. Seleccionar la pestaña “Monthly variation”, seleccionar la opción “monthly time-series wizard”, luego ingresar los siguientes datos: octubre a enero = 0 %, febrero y marzo = 5 %, abril, mayo, septiembre = 10 %, junio = 20 %, julio = 25 % y agosto 15 % (Figura 50).

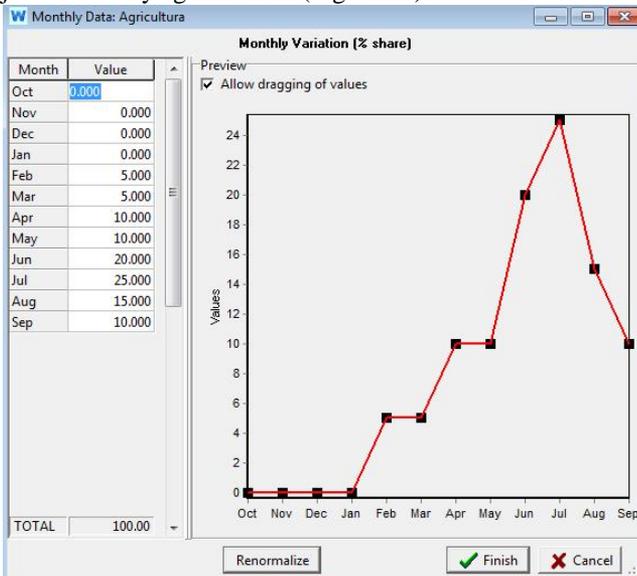


Figura 50. Variación mensual del nodo agricultura.

Finalmente en la carpeta consumption, anotar 90.

- **Conectar la demanda con el suministro**

Se deberá conectar el suministro del recurso a los sitios de demanda. Clic en la opción “Schematic” y elegir la opción “Transmission Link”, arrastrar el icono presionando el botón derecho y posicionar sobre el río, luego direccionar al nodo correspondiente, primero para ciudad y después para agricultura. Definir la preferencia como 1 para ambos (Figura 51).

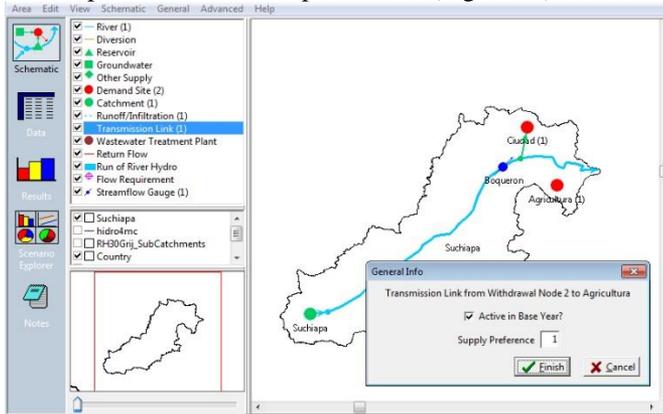


Figura 51. Conectando el suministro con la demanda.

En la barra de la izquierda, seleccionar “Results”, dar clic en “yes” para recalculer el modelo, una vez que termine la ejecución del programa, en la pantalla seleccionar la pestaña “chart”, posteriormente elegir la opción “Demand”, y seleccionar, “water demand” (Figura 52), aquí se mostrará la demanda por nodo ingresado al modelo. Posteriormente seleccionar “coverage”, en vez de “water demand”, esta opción le permitirá ver en donde el suministro no es suficiente a la demanda (Figura 53).

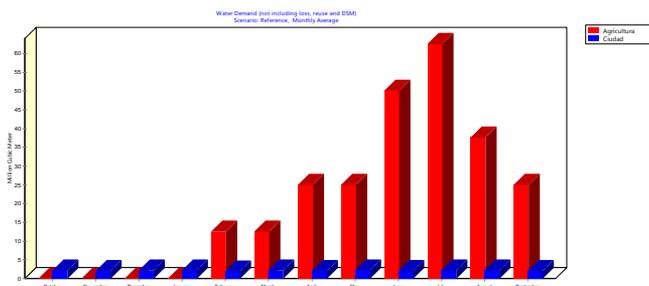


Figura 52. Demanda de agua por sector en el modelo.

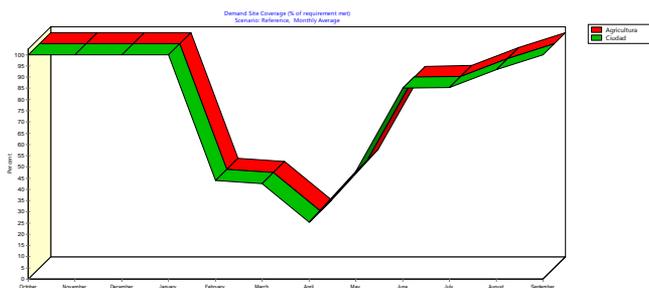


Figura 53. Porcentaje de suministro mensual por sector de modelo.

### Fuentes de datos

En la actualidad existen diversas fuentes de información digital que al usuario podrían ser de utilidad al desarrollar un proyecto en WEAP, las siguientes fuentes son de utilidad para México.

1.- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI): el acervo de este apartado incluye diversos temas que incluyen: cartografía urbana, datos de relieve, imágenes del territorio, marco geoestadístico nacional, recursos naturales, topografía, entre otros. [www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geografia/default.aspx](http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/geografia/default.aspx)

2.- Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL v2.1) del INEGI: es una herramienta que permite modelar el drenaje superficial de una determinada cuenca, así como aplicaciones que permiten al usuario identificar información relacionada con las cuencas del país. [http://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/SIATL/#](http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/#)

3.- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO): presenta un portal de geoinformación el cual despliega diferentes capas relacionadas con aspectos topográficos, hidrológicos, clima, vegetación, etc.

<http://www.naturalia.org.mx/es/revista/revista.aspx?pantalla=ESDI>

4.- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA): esta dependencia a través del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) presenta el Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) que integra la red hidrométrica nacional. En esta red se registra el nivel de agua (escalas) y los aforos en los principales ríos de la República Mexicana.

[http://www.imta.gob.mx/index.php?Itemid=145&option=com\\_wrapper&view=wrapper](http://www.imta.gob.mx/index.php?Itemid=145&option=com_wrapper&view=wrapper)

### Modelo SWAT

El modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tool, Arnold et al., 1998) ha sido desarrollado para simular los efectos en variables hidrológicas como resultado de las prácticas de manejo realizadas en las cuencas (Winchell *et al.*, 2010). Este modelo emerge de previos modelos i.e SWRRB (Arnold et al., 1990) con características de modelos como CREAMS, GLEAMS, EPIC, y ROTO (Arnold et al., 1995). Es un modelo operacional que trabaja en escala temporal diaria. SWAT tiene ocho componentes principales: hidrología, climatología, sedimentación, temperatura del suelo, crecimientos del cultivo, nutrientes, pesticidas y manejo agrícola. Aunque la mayoría de las aplicaciones del modelo son en base daría, recientes modificaciones como la incorporación del modelo de Green y Ampt (1911) para el cálculo de infiltración, utilizan incrementos de tiempo a cualquier escala y el tránsito de agua en los canales a escala horaria. SWAT es un modelo de parámetros distribuidos puesto que considera la variación espacial de los atributos y propiedades físicas de la cuenca hidrológica.

El presente manual ha sido diseñado para que el usuario del modelo, con conocimientos elementales de los sistemas de información geográfica (ArcMap en este caso) pueda hacer uso del modelo. Este modelo se encuentra hospedado en el GIS ArcMap y la aplicación se titula ArcSwat. Es recomendable hospedar la aplicación en la versión del GIS 9.3. Así el documento tiene como

objetivo guiar paso a paso al usuario con poca o nula experiencia en el manejo del software, tanto de ArcGIS como de SWAT.

#### Antes de iniciar

Se debe tener certeza de que se cuenta con los archivos de entrada y base de datos necesarios para correr el programa, dicha información se enlista a continuación (Arnold *et al.*, 2009):

Tabla userwgn (tabla de generador climático). Este es un archivo en formato Microsoft Access Database proveído con la información del modelo, por lo que se recomienda usarlo e incluir solo los datos inherentes al caso de estudio que corresponda. Esta tabla se encuentra en el archivo SWAT2009, que contiene una serie de tablas con distinta información en cada una de ellas y se localiza por default en el directorio C:>Swat>ArcSWAT>Databases.

Al momento de abrir la tabla (doble clic), desplegará valores mensuales ordenados en distintas columnas, enlistadas como sigue:

- a) nombre de la estación (STATION).
- b) latitud (WLATITUDE) y longitud (WLONGITUD) (en grados decimales).
- c) elevación de la estación (WELEV).
- d) número de años con datos de lluvia (RAIN\_YRS).
- e) temperatura máxima (TMPMX) y temperatura mínima (TMPMN).
- f) desviación estándar de la temperatura máxima (TMPSTDMX).
- g) desviación estándar de la temperatura mínima (TMPSTDMN).
- h) precipitación (PCPMM).
- i) desviación estándar de la precipitación (PCPSTD).
- j) coeficiente de asimetría para la precipitación diaria (PCPSKW).
- k) probabilidad de día con lluvia después de un día seco (PR\_W1).
- l) probabilidad de día con lluvia después de un día húmedo (PR\_W2).
- m) días de precipitación (PCPD).
- n) precipitación máxima en 0.5 h para el periodo completo registrado (RAINHHMX).
- o) radiación solar (SOLARAV).
- p) media de punto de rocío (DEWPT).
- q) velocidad del viento (WNDV).

El procedimiento para obtener los datos de las columnas de TMPMX a PCPD, se realiza mediante el uso de dos programas computacionales que facilitan el procesamiento de la información,

que son “PARAMETROS2”<sup>‡</sup> y “WXPARM” (Williams, 1992). Cabe mencionar, que tanto el archivo que contiene la información climatológica, así como estas dos herramientas deben estar contenidos en el mismo directorio o carpeta (en este caso la carpeta se denomina WXPARM). La primera herramienta a utilizar es “PARAMETROS2”, como se describe a continuación:

- 1) Se abre la estación climatológica deseada en Excel, en este caso tomaremos el ejemplo de la estación 09007 (Figura 54).
- 2) Las columnas H e I se eliminan, así como también la primera fila (evaporación, temperatura media, y encabezados) (Figura 55).

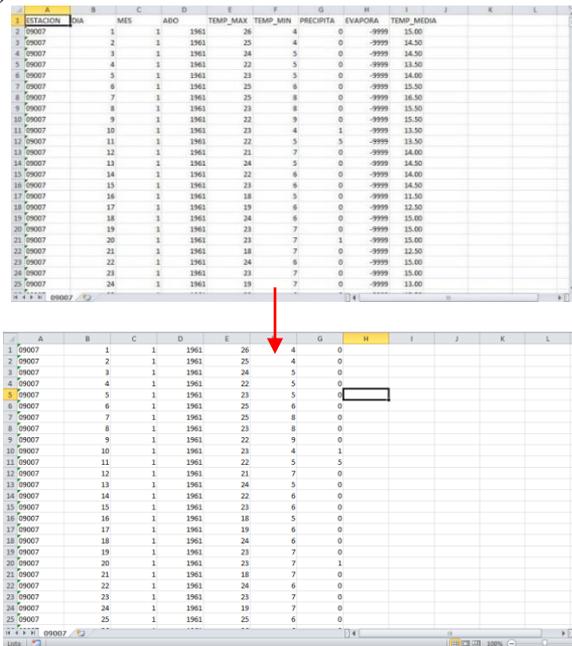


Figura 54. Bases de datos antes de su manipulación.

- 3) El archivo debe contener años completos de 365 o 366 días con información disponible para procesarse, en caso de tener información faltante con el código -9999 en el archivo, se eliminará el año completo.

<sup>‡</sup> Programa de computo desarrollado por los autores para dar formato a la serie de datos climática y posterior uso en la aplicación WXPARM

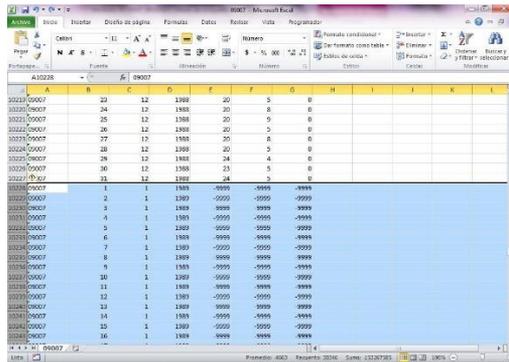


Figura 55. Eliminación de datos perdidos.

- 4) Guardar en un archivo nuevo y dar el nombre correspondiente con la extensión “.CSV” (delimitado por comas). El nombre del archivo quedará entonces como “9007-28.CSV”. El número marcado con rojo indica la cantidad de años existentes en el archivo.

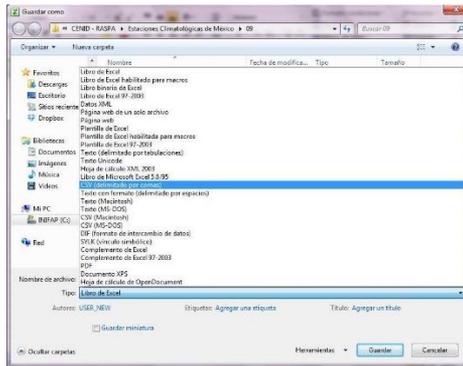


Figura 56. Opción para guardar archivos delimitados por comas.

- 5) Ya que se tienen los archivos con la extensión “\*.CSV” (el archivo debe ser guardado dentro de la carpeta WXPARM) se procede a abrir la herramienta “PARAMETROS2.exe” (Figura 57), la cual se ejecuta dando doble clic sobre el icono de la aplicación.



Figura 57. Pantalla inicial del Programa Parámetros 2.

6) Se introduce la información del archivo que se va a convertir, como sigue:

NOMBRE DE ARCHIVO CON LOS DATOS ----> 9007-28.CSV

NOMBRE DE ARCHIVO DE SALIDA ----- > 9007-28.DAT

LONGITUD DEL ARCHIVO -----> 28 (número de años existentes en el archivo)

AÑO DE INICIO-----> 61

NOTA: Si al dar enter, el programa muestra lo que se ve en la Figura 58, significa que corrió correctamente, de lo contrario, verificar que los archivos de entrada y las instrucciones sean las adecuadas.

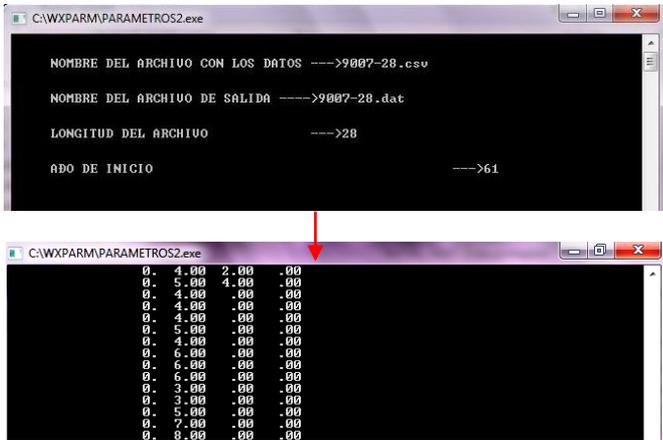


Figura 58. Pantallas del programa Parámetros 2.

7) El resultado es la generación del archivo 9007-28.DAT

El archivo generado será utilizado en la herramienta WXPARM, el cual se ejecuta desde el sistema MS-DOS identificado con el icono de símbolo del sistema. Existen diversas maneras de acceder a esta aplicación, a) que el ícono aparezca directamente en la barra de programas; b) que esté contenida en el siguiente directorio: Inicio>Programas>Accesorios, y c) tecleando la palabra "cmd" en la opción de búsqueda de programas y archivos (ver Figura 59).

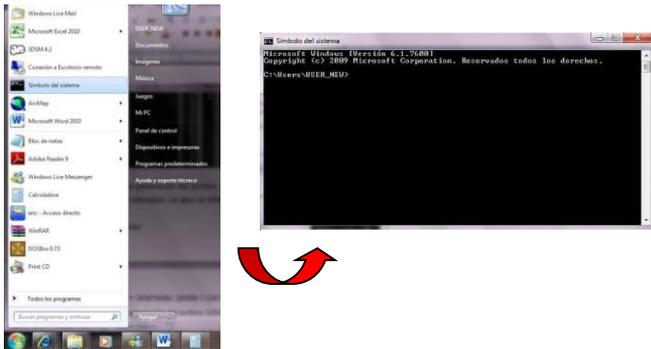


Figura 59. Búsqueda del programa WXPARM en el MSDOS.

8) Se introducen las siguientes instrucciones:

C:\> CD WXPARM

C:\> WXPARM > WXPARM 9007-28.DAT

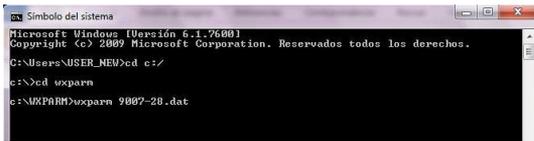


Figura 60. Introducción de nombre de archivo de entrada al programa WXPARM.

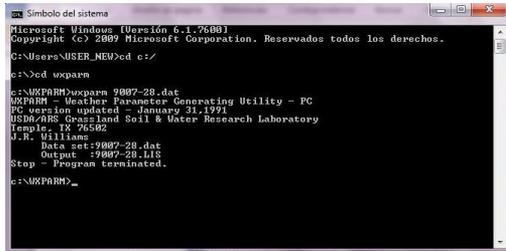


Figura 61. Pantalla que muestra la ejecución exitosa del programa WXPARM.

El resultado es la generación del archivo *9007-28.LIS*, el cual muestra las variables climáticas existentes con sus respectivos parámetros estadísticos (Figura 62).

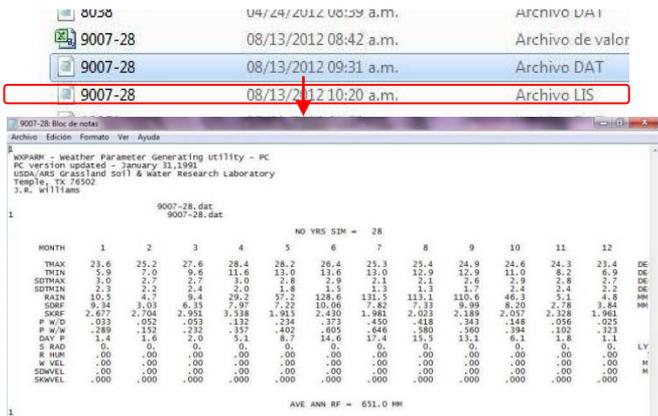


Figura 62. Formato de salida de la ejecución del programa WXPARM (archivo “\*.LIS”).

Finalmente, se obtienen los datos mensuales necesarios para armar la tabla userwgn (Figura 63).

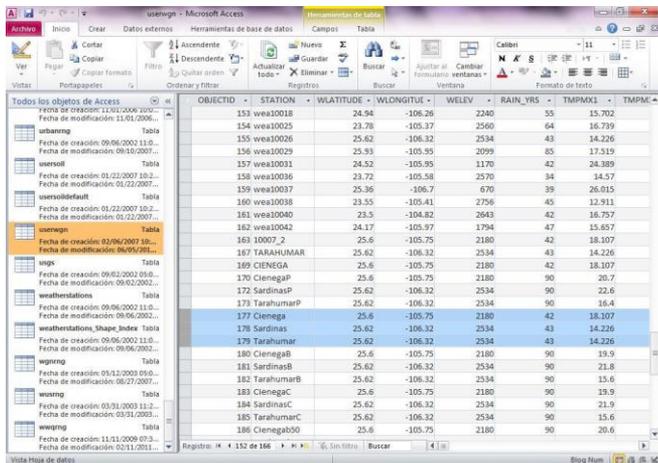


Figura 63. Introducción de los datos generados con el programa WXPARM a la base de datos “userwgn”.

Otra información primordial para el uso de SWAT son los siguientes archivos:

1. **Archivos de localización.** El formato de estos archivos será .dbf, los cuales se recomienda elaborarlos en versiones de Excel anteriores a 2007 y guardarlos como dbase IV.

Se crean dos archivos, uno que contiene la información de localización de la estación climatológica y un segundo, que contiene la información diaria. El archivo de localización para la variable temperatura, se debe de crear con el nombre “temp”, los encabezados de las columnas serán ID, NAME, XPR, YPR y ELEVATION, las palabras en la columna NAME, deben coincidir con el nombre del archivo que contiene los datos diarios de temperatura, las coordenadas de las columnas “XPR” e “YPR” deberán estar en UTM (en inglés, Universal Transverse Mercator), en la columna ELEVATION, se colocarán las altitudes a las que se encuentran las estaciones climatológicas (Figura 64).

	A	B	C	D	E
1	ID	NAME	XPR	YPR	ELEVATION
2		1 tmp91007	433052	2829546	2144.000
3		2 tmp91078	443326	2883020	1600.000
4		3 tmp91026	364468	2835605	2560.000

tmp91007	1	05/31/2012 10:30 a...	Archivo DBF
tmp91026	3	05/31/2012 10:07 a...	Archivo DBF
tmp91078	2	05/31/2012 10:08 a...	Archivo DBF

Figura 64. Identificación del archivo de localización (izquierda) y bases de datos (derecha) de temperatura.

El mismo procedimiento se realiza para la variable de precipitación, pero con el nombre de archivo “precip”, los encabezados de las columnas serán ID, NAME, XPR, YPR y ELEVATION. Los datos a colocar son los mismos que los del archivo de temperatura (Figura 65).

	A	B	C	D	E
1	ID	NAME	XPR	YPR	ELEVATION
2		1 pcp91007	433052	2829546	2144
3		2 pcp91078	443326	2883020	1600
4		3 pcp91026	364468	2835605	2560

pcp91007	1	05/31/2012 09:37 a...	Archiv
pcp91026	3	05/31/2012 10:04 a...	Archiv
pcp91078	2	05/31/2012 10:06 a...	Archiv

Figura 65. Identificación del archivo de localización (izquierda) y bases de datos de precipitación (derecha).

Una vez creados los archivos mencionados anteriormente, se procede a crear un archivo de localización de estaciones, el cual será nombrado como “wgnstation” y debe contener columnas con los siguientes encabezados ID, NAME, XPR e YPR. La columna NAME tendrá que coincidir con el nombre en la columna STATION de la tabla userwgn de “SWAT2009”. Las coordenadas deben de colocarse en metros (Figura 66).

	A	B	C	D	E
1	ID	NAME	XPR	YPR	
2		1 Cienega	433052	2829546	
3		2 Sardinas	443326	2883020	
4		3 Tarahumar	364468	2835605	

OBJECTID	STATION	WLATITUDE
170	Cienega	
172	Sardinas	2
173	Tarahumar	2

Figura 66. Concatenación de la localización (izquierda) y el nombre de las estaciones (derecha).

2. **Archivos con datos diarios.** Estos archivos deberán estar en formato .dbf, por lo que se recomienda hacer las tablas en Excel en versiones anteriores a 2007 y guardarlos como dbase IV. Los archivos de temperatura y precipitación de cada estación, tendrán las siguientes especificaciones:

*Archivos de temperatura.* El nombre de cada uno de estos archivos debe coincidir con el de la columna NAME en el archivo “temp”. El archivo contendrá tres columnas con los encabezados DATE, MAX y MIN. El formato de la columna DATE será mm/dd/yyyy (Figura 67).

	A	B	C	D
1	DATE	MAX	MIN	
2	01/01/1991	23	4	
3	01/02/1991	22	6	
4	01/03/1991	20	6	
5	01/04/1991	19	1	
6	01/05/1991	19	-3	
7	01/06/1991	21	-2	
8	01/07/1991	19	-6	
9	01/08/1991	15	-10	
10	01/09/1991	15	-4	
11	01/10/1991	19	-4	
12	01/11/1991	20	-1	

Figura 67. Muestra de datos de temperatura.

*Archivos de precipitación.* El nombre de cada uno de estos archivos debe coincidir con el de la columna NAME en el archivo “precip”. El formato de la columna DATE estará en mm/dd/yyyy (Figura 68).

	A	B
1	DATE	PCP
2	01/01/1975	0.0
3	01/02/1975	0.0
4	01/03/1975	0.0
5	01/04/1975	0.0
6	01/05/1975	0.0
7	01/06/1975	1.0
8	01/07/1975	0.0
9	01/08/1975	0.0
10	01/09/1975	0.0
11	01/10/1975	0.0

Figura 68. Muestra de datos de precipitación.

NOTA: los archivos deben contener Información continua para los años observados, datos perdidos con el código -9999 ¡NO LOS ACEPTA!. Sin embargo, los vacíos se pueden llenar con el programa CLIMGEN.

Otra información necesaria es:

3. Modelo digital de elevación (MDE) de la cuenca.
4. Mapas de vegetación y edafología en formato raster.

- Cuadros de vegetación y edafología donde se especifique el tipo de vegetación y suelo presentes en los mapas respectivos (Figura 69).

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayud
"value", "Landuse"				
1, PINE				
2, OAK				
3, PANA				
4, AGRR				
5, AGRR				
6, URBA				
7, VAG				
8, MXEP				
9, WATR				
10, MXEP				

Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayud
"value", "Name"				
1, BChh2				
2, Kkck2p				
3, Hhvc3L				
4, Jere1				
5, IBe2				
6, Lc2				
7, weBc2G				
8, wmvp2G				
9, xhe2G				

Figura 69. Cuadros \*.txt que indican los tipos de vegetación (izquierda) y de suelo (derecha) presente en el área de estudio.

Los tipos de vegetación y tipos de suelo están capturados en las tablas “crop” y “usersoil”, respectivamente, del archivo “SWAT2009”. Tanto los nombres de los tipos de suelo, como los de vegetación que se definan en los cuadros mencionados, deberán ser coincidentes con los de las columnas SNAM en la tabla “usersoil” y CPNM en la tabla “crop” (ver Figuras 70, 71 y 72).

OBJECTID	ICNLM	CPNM	IDC	CROPNAM	BIO_E	HVSTI	BLAI
17	17	SWRN	6	Southwestern	34	0.9	
18	18	WATR	6	Water	0	0	
19	19	CORN	4	Corn	39	0.5	
20	20	CSIL	4	Corn Silage	39	0.9	
21	21	SCRN	4	Sweet Corn	39	0.5	
22	22	ESAM	6	Eastern Gamagrass	21	0.9	
23	23	ORSG	4	Great Sorghum	33.5	0.45	
24	24	SGHY	4	Sorghum Hay	33.5	0.9	
25	25	JHGR	6	Johnsongrass	35	0.9	
26	26	SHNC	6	Sugarcane	25	0.5	
27	27	DWHT	5	Spring Wheat	35	0.42	
28	28	WWHT	5	Winter Wheat	30	0.4	
29	29	DWHT	5	Durum Wheat	30	0.4	
30	30	RYE	5	Rye	35	0.4	
31	31	BARL	5	Spring Barley	35	0.54	
32	32	OATS	5	Oats	35	0.42	
33	33	RICE	4	Rice	22	0.5	
34	34	PHNL	4	Pearl Millet	35	0.29	
35	35	TIMO	6	Timothy	35	0.9	
36	36	BROS	6	Smooth Brom	35	0.9	
37	37	BROM	6	Meadow Brom	35	0.9	
38	38	FESC	6	Tall Fescue	30	0.9	
39	39	BLUG	6	Kentucky Blue	18	0.9	
40	40	BERM	6	Bermudagrass	35	0.9	
41	41	CWBR	6	Crested Wheat	35	0.9	
42	42	WMDR	6	Western Whea	35	0.9	

Figura 70. Despliegue de la tabla “crop” del archivo “SWAT2009”.

FID	SHAPE*	AREA	PERIMETER	US4	US4_ID	CVE	USOR	ECOS_VEGE	DEVEG	FORMACION	RECTAREA*
1	Polygon	68050625.83	2078612.2319	16422	16421	BP		BOSQUE DE CONIFERAS	PRIMARIO	COMPERAS	680314.6812
2								BOSQUE DE CONIFERAS	SECUNDARIO	COMPERAS	19445.2401
3								BOSQUE DE CONIFERAS	PRIMARIO	COMPERAS	1597.6272
4								BOSQUE DE ENCINO	PRIMARIO	COMPERAS Y LATIFOLIADAS	1892.0482
5								BOSQUE DE CONIFERAS	PRIMARIO	COMPERAS	5572.2065
6								BOSQUE DE CONIFERAS	SECUNDARIO	COMPERAS	533.04125
7								BOSQUE DE ENCINO	SECUNDARIO	COMPERAS Y LATIFOLIADAS	15337.05921
8								PASTIZAL	PRIMARIO	OTRAS AREAS FORESTALES	5697.8945E
9								BOSQUE DE ENCINO	SECUNDARIO	COMPERAS Y LATIFOLIADAS	226.60451
10								BOSQUE DE ENCINO	PRIMARIO	COMPERAS Y LATIFOLIADAS	485.2401
11								BOSQUE DE ENCINO	SECUNDARIO	COMPERAS Y LATIFOLIADAS	2902.7874
12								BOSQUE DE ENCINO	PRIMARIO	LATIFOLIADAS	187.72402
13								BOSQUE DE CONIFERAS	SECUNDARIO	COMPERAS	2842.39154
14								BOSQUE DE CONIFERAS	SECUNDARIO	COMPERAS Y LATIFOLIADAS	15206.1756E
15								PASTIZAL	PRIMARIO	OTRAS AREAS FORESTALES	143.7424
16								BOSQUE DE CONIFERAS	SECUNDARIO	COMPERAS Y LATIFOLIADAS	1726.5072
17								BOSQUE DE CONIFERAS	PRIMARIO	COMPERAS	2036.0855E
18								BOSQUE DE CONIFERAS	PRIMARIO	COMPERAS Y LATIFOLIADAS	212.9120E
19								BOSQUE DE CONIFERAS	SECUNDARIO	COMPERAS	787.42911
20								PASTIZAL	PRIMARIO	OTRAS AREAS FORESTALES	9555.82149
21								BOSQUE DE ENCINO	SECUNDARIO	COMPERAS Y LATIFOLIADAS	429.6212E
22								BOSQUE DE CONIFERAS	SECUNDARIO	COMPERAS	510.212764
23								BOSQUE DE ENCINO	SECUNDARIO	COMPERAS Y LATIFOLIADAS	226.4096E
24								BOSQUE DE ENCINO	SECUNDARIO	COMPERAS Y LATIFOLIADAS	8616.8026E
25								BOSQUE DE ENCINO	PRIMARIO	COMPERAS Y LATIFOLIADAS	763.348E
26								PASTIZAL	SECUNDARIO	OTRAS AREAS FORESTALES	637.9128E
27								PASTIZAL	SECUNDARIO	OTRAS AREAS FORESTALES	61.79944
28								BOSQUE DE ENCINO	SECUNDARIO	LATIFOLIADAS	18181.4932E
29								NO APLICABLE	NO APLICABLE	NO APLICABLE	144.4679E
30								NO APLICABLE	NO APLICABLE	NO APLICABLE	600.7969E
31								NO APLICABLE	NO APLICABLE	NO APLICABLE	1816.5224E
32								NO APLICABLE	NO APLICABLE	NO APLICABLE	74.2671E
33								PASTIZAL	SECUNDARIO	OTRAS AREAS FORESTALES	3997.2721E
34	Polygon	3997271.8407	69322.997895	32222	32221	USA/PA		PASTIZAL	SECUNDARIO	OTRAS AREAS FORESTALES	3997.2721E
35	Polygon	3643026.5189	87969.361106	32229	32229	USA/PA		NO APLICABLE	NO APLICABLE	NO APLICABLE	3643.026E
36	Polygon	403478.21568	16514.096653	32262	32261	USA/PA		NO APLICABLE	NO APLICABLE	NO APLICABLE	403.478E
37	Polygon	2338976.2347	40121.641163	32262	32261	USA/PA		BOSQUE DE ENCINO	SECUNDARIO	COMPERAS Y LATIFOLIADAS	2338.9796E
38	Polygon	177274.241923	6268.261118	32218	32218	PA		PASTIZAL	SECUNDARIO	OTRAS AREAS FORESTALES	177.274E

Figura 71. Vista de la tabla de atributos de un mapa de uso de suelo y vegetación, donde se puede observar los tipos de vegetación.

OBJETO_ID	MUNID	SEQN	S_NAM	SSID	CMPCTR	NLAYERS	HYDRG
204		1	BcHr2		100	7	B
205		1	Bc12L		100	2	C
206		1	BcHr2L		100	2	C
207		1	Bc10G		100	3	B
208		1	Bc12L		100	2	C
209		1	Bc12		100	7	B
210		1	Bc10ZP		100	3	B
211		1	BcHr2L		100	2	C
212		1	BcPe2		100	7	B
213		1	BcRe2L		100	2	C
214		1	BcV2		100	7	B
215		1	BcHr2L		100	2	C
216		1	BcHr2L		100	2	C
217		1	BcHr2L		100	2	C
218		1	BcHr1		100	7	B
219		1	BcHr2		100	7	B
220		1	BcHr3G		100	3	B
221		1	BcHr1		100	2	C
222		1	BcHr2P		100	3	B
223		1	HrC3L		100	3	B
224		1	HrC2PC		100	7	B
225		1	HrH2P		100	3	D
226		1	HrH2P		100	3	D
227		1	HrH2L		100	3	B
228		1	HrH2L		100	5	C
229		1	HrH2L		100	3	B

Figura 72. Despliegue de la tabla “usersoil” del archivo “SWAT2009”.

Crear un nuevo proyecto

Los pasos a seguir para iniciar ArcSWAT son (Winchell *et al.*, 2010):

1. Abrir ArcXMap versión 9.3 desde su barra de inicio.
2. Una vez abierto el software, activar la barra de herramientas ArcSWAT (clic derecho sobre barra de menús) (Figura 73).

3. Crear un nuevo proyecto en SWAT Project Setup y después dar clic en New SWAT Project.

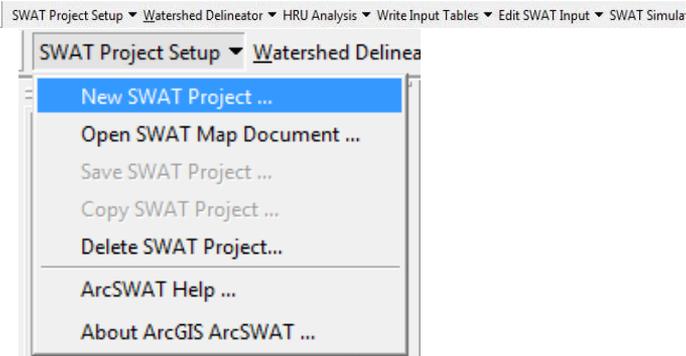
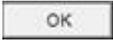


Figura 73. Inicio de un nuevo proyecto de SWAT.

4. En la ventana que se despliega, en la opción Project Directory direccionar a la carpeta donde se desee guardar todos los resultados generados por el proceso.

5. En la opción SWAT Parameter Geodatabase seleccionar el archivo en donde se tienen las tablas userwgn, usersoil y crop, creadas anteriormente, es decir, el archivo *SWAT2009* (Figura 74).

6. Dar clic en  y se desplegará un mensaje indicando que el proyecto ha sido creado satisfactoriamente.

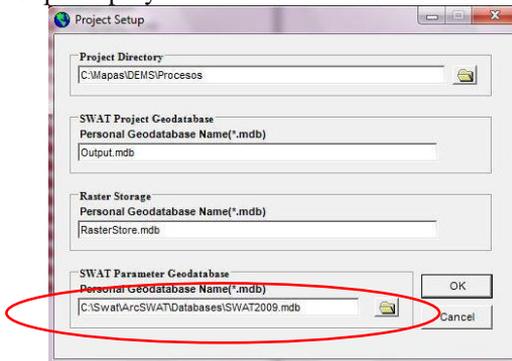


Figura 74. Ventana para direccionar los archivos de salida e indicar donde se encuentran los archivos de entrada

## Delineación de la cuenca

Para delinear la cuenca, dar clic en Watershed Delineator y seleccionar la opción Automatic Watershed Delineation (Figura 75).

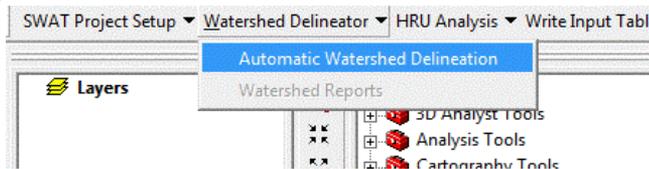


Figura 75. Ubicación de la opción Automatic Watershed Delineation.

Con esa acción se despliega el menú de opciones de la ventana Watershed Delineation, donde se seguirán los siguientes pasos:

1. Cargar el modelo digital de elevación (MDE) en la opción DEM Setup, ya sea desde los mapas activos o desde algún directorio en el cual se tenga un archivo de este tipo (Figura 76).

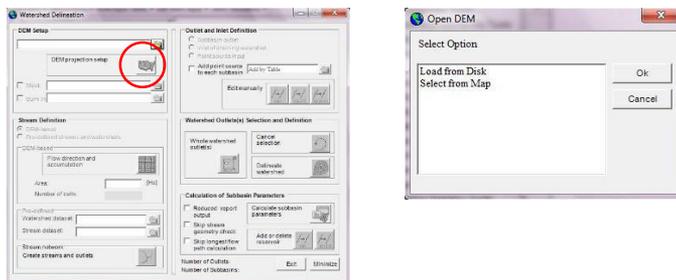


Figura 76 Ventana para dibujar la cuenca (izquierda) y ventana para cargar el mapa desde algún directorio del disco o directamente de ArcMap (derecha).

2. En el ícono (DEM projection setup) elegir metros para unidades de Z (Figura 77).

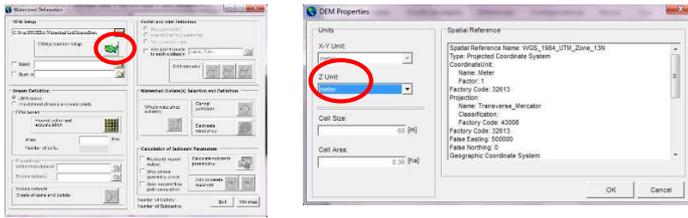


Figura 77. Elección de unidades en metros.

3. El siguiente paso es Stream Definition, que definirá el área de la cuenca acorde al modelo digital de elevación.
4. Dar clic en Stream network, después es posible agregar puntos de salida como se indica en las siguientes imágenes. Estos puntos de salida son preferentemente los sitios en donde se encuentran las estaciones de aforo de flujos observados para fines de calibración (Figuras 78 y Figura 79).



Figura 78. Opciones para definir manualmente las salidas de las subcuencas y cuenca principal.

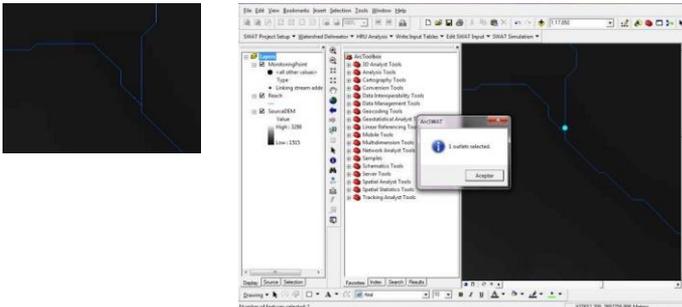


Figura 79. Vista de selección de salida de la cuenca.

5. Delinear la cuenca con clic en el ícono Delineate Watershed. Esta opción permite delinear la cuenca en función del punto elegido de salida.
6. Dar clic en Calculate subbasin parameters
7. Agregar o borrar reservorio.

- Realizados los pasos anteriores, al cerrar la ventana, los datos se exportarán automáticamente (Figura 80).



Figura 80. Mensaje que aparece al finalizar la delimitación de la cuenca.

Una vez delimitada la cuenca, la pantalla se mostrará similar a la siguiente (Figura 81):

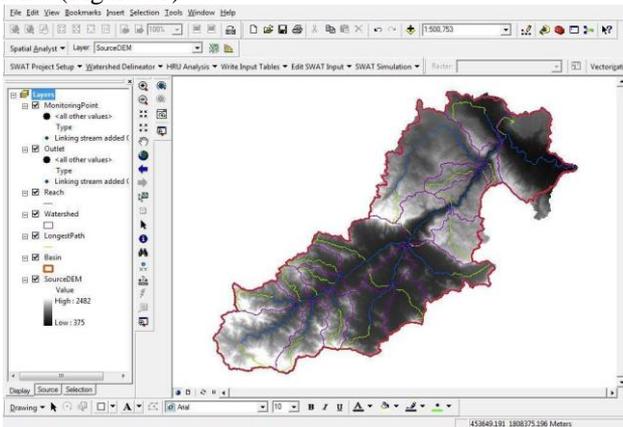


Figura 81. Cuenca que presenta delimitados el límite de la cuenca, el río principal y corrientes secundarias.

### Análisis de Unidades de Respuesta Hidrológica

En el botón HRU (Hydrologic Response Unit) se despliegan 3 opciones, de las cuales, elegir Land/Use/Slope Definition, que permitirá abrir los mapas raster de uso de suelo, edafología y además, se agregarán los valores de la pendiente. Este paso se compone de una serie de instrucciones a saber.

- En la pestaña de Land Use Data dar clic en el icono  y seleccionar el raster de uso de suelo y vegetación. El mensaje siguiente debe de aparecer (Figura 82).

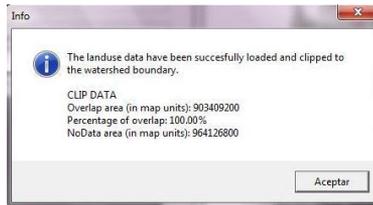


Figura 82. Mensaje que indica que se cargó correctamente el MDE.

2. En Choose Grid Field elegir la opción VALUE.
3. Posteriormente, en la opción LookUp Table, elegir User Table y seleccionar el cuadro “.txt” de uso de suelo y vegetación (Figura 83). Esta tabla deberá ser capturada previamente, acorde a la nomenclatura del uso de suelo en el archivo *SWAT2009*.

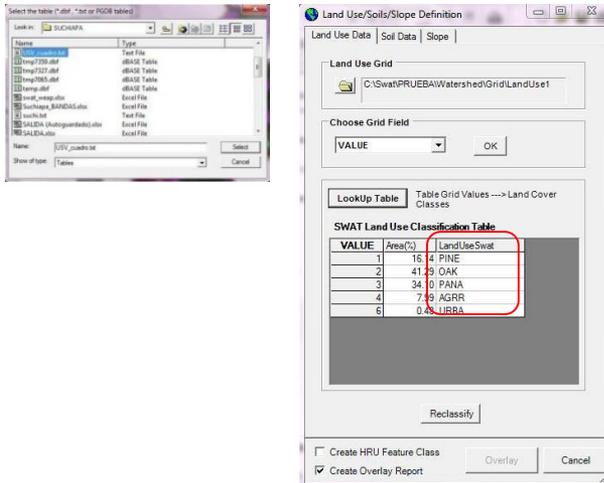


Figura 83. Elección (izquierda) y despliegue (derecha) del cuadro de uso de suelo.

Señalada está la clasificación que corresponde con el archivo *SWAT2009*.

4. Para agregar el mapa de edafología, seleccionar Soil Data y repetir los pasos del 10 al 12, pero en Options elegir Name (Figura 84).

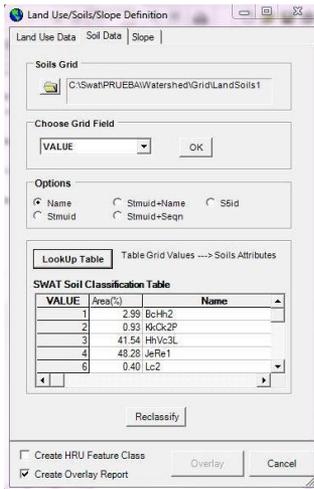


Figura 84. Elección de la tabla de edafología.

5. En la pestaña Slope elegir el número de clases de pendientes deseado y el porcentaje que tendrá cada una, agregándolas a SWAT Slope Classification Table con el botón Add (Figura 85).

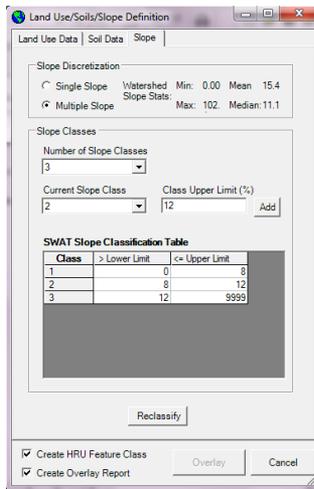


Figura 85. Elección de la pendiente de la cuenca.

6. Activar la casilla Create HRU Feature Class.

7. Presionar el botón **Reclassify**, en cada una de las pestañas Land Use Data, Soil Data y Slope, deben de aparecer los siguientes mensajes para cada opción (Figura 86).



Figura 86. Mensajes que aparecen después de reclasificar el uso de suelo, edafología y pendiente.

8. Presionar **Overlay** y debe desplegarse el siguiente mensaje (Figura 87):

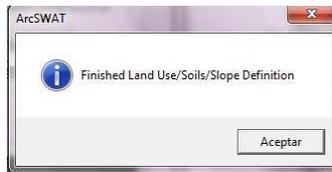


Figura 87. Mensaje que indica que se realizó correctamente la superposición.

9. El siguiente paso en HRU Analysis es HRU Definition, donde se pueden agregar características de porcentaje de cobertura de vegetación, tipo de suelo y pendiente (Figura 88 y Figura 89).

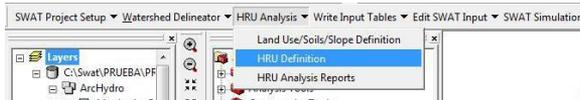


Figura 88. Localización de la opción HRU Definition.

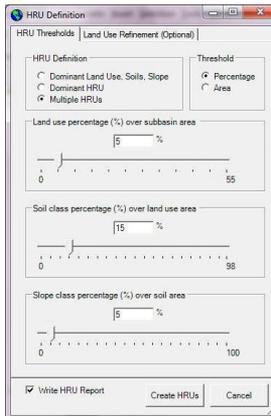


Figura 89. Ventana para elegir los porcentajes de coberturas de la subcuenca por los usos de suelo, tipos de suelo y pendiente.

10. Al presionar el botón  se mostrará el mensaje siguiente (Figura 90):

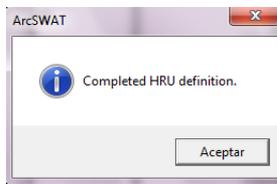


Figura 90. Mensaje que aparece después de la definición de las unidades de respuesta hidrológica.

### Definición de los cuadros de entrada

1. En Write Input Tables se elige la opción Weather Stations (Figura 91).

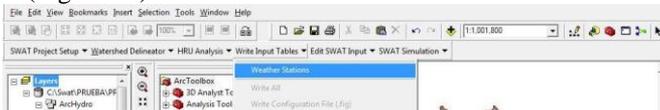


Figura 91. Opción para agregar los datos de las estaciones climatológicas.

Al dar clic, se mostrará la ventana de Weather Data Definition (Figura 92).

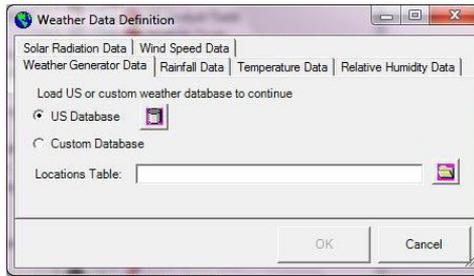


Figura 92. Ventana de Weather Data.

2. En la pestaña de *Weather Generation Data* elegir la opción de *Custom Database* y elegir con el botón  el archivo con el nombre wgnstation.dbf.
3. Después pasar a la pestaña *Rainfall Data*, seleccionar *raingages* y abrir el archivo precip.dbf.
4. En *Temperature Data* seleccionar *Climate Stations* y abrir el archivo temp.dbf.
5. Clic en botón  y esperar el siguiente mensaje (Figura 93):



Figura 93. Mensaje de confirmación de que la base de datos de clima se cargó correctamente.

6. Reescribir la información en la opción Write All (Figura 94).



Figura 94. Opción para reescribir todos los archivos.

7. Desplegará la siguiente pregunta: Will you be using default Manning's N and heat unit inputs (U.S. only)? Después de contestar "si", aparecerá el cuadro siguiente (Figura 95):



Figura 95. Mensaje que indica que todas las tablas necesarias para que el modelo corra estan listas.

Aparecerán ahora activas todas las bases de datos (Figura 96).

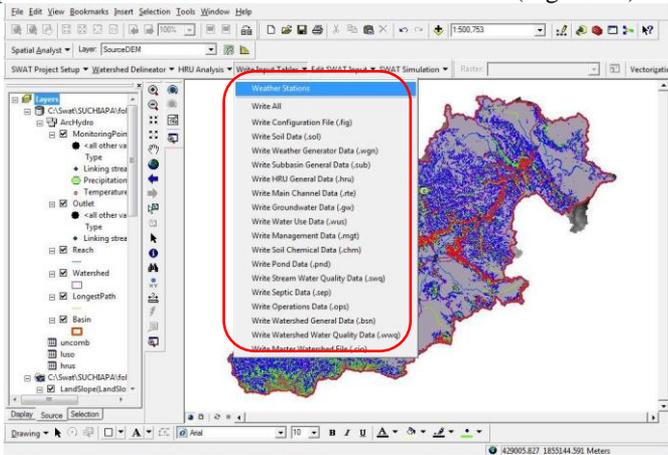


Figura 96. Archivos con información actualizada.

Edición de datos de entrada

Pasar a Edit SWAT Input y abrir las bases de datos (Figura 97).

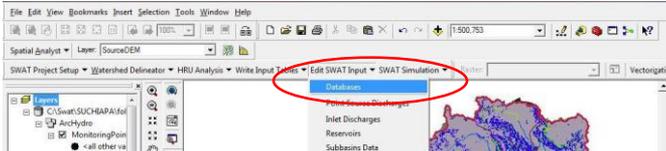


Figura 97. Opción para abrir las bases de datos del modelo.

Aquí se pueden modificar los datos de los cuadros de la base de datos que se direccionan desde la definición del directorio del proyecto (Figura 98).

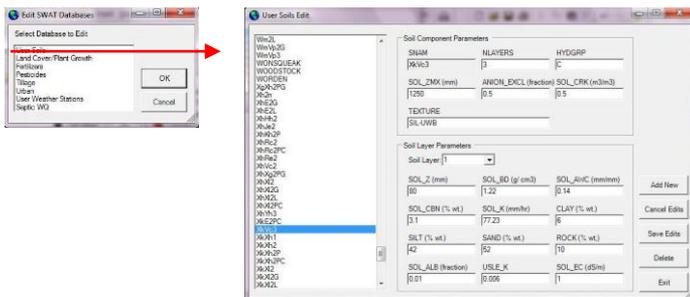


Figura 98. Vista de los tipos de suelos definidos en el archivo de entrada del modelo.

### Corriendo el modelo

1. Dar clic en SWAT Simulation y seleccionar la opción RunSWAT (Figura 99).

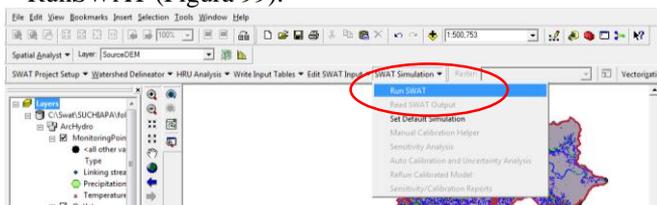


Figura 99. Selección de la opción RunSWAT.

2. Definir la fecha de inicio y de término que indique el periodo de simulación. La fecha final debe estar en mm/dd/yyyy.
3. Clic en Setup SWAT Run, esperar el mensaje de Finish SWAT Setup y finalizar con un clic en Run SWAT (Figura 100).

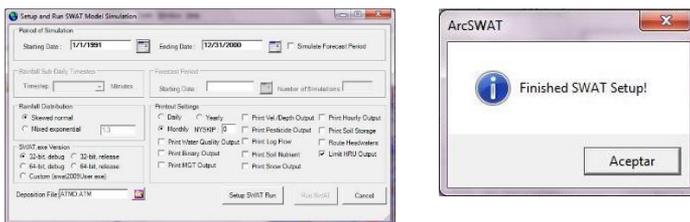


Figura 100. Ventana donde se define las características de la salida (izquierda) y mensaje que indica que los datos definidos se han actualizado correctamente (derecha).

La pantalla mostrará los años simulados y el mensaje de éxito de la simulación (Figura 101).



parámetros el modelo debe ser calibrado con cierto criterio, considerando datos observados del parámetro. Este proceso implica que el modelador o usuario del modelo tenga un claro conocimiento de todos los parámetros de entrada del modelo así como de los procesos representados en el mismo. Así, aquellos parámetros que no son bien conocidos, en el proceso de calibración, se deben dejar como fijos aún si presentan cierta sensibilidad o son ajustados a valores poco probables. El desconocimiento de la sensibilidad de los parámetros, dificulta el proceso de calibración ya que se puede perder demasiado tiempo ajustando parámetros que presentan poca o nula variación cuando los datos de entrada son cambiados. La focalización debe ser hacia los parámetros sensibles del modelo ya que esto conduce a un mejor entendimiento y mejor estimación de sus valores reduciendo la incertidumbre.

Así entonces, el análisis de sensibilidad en los modelos de simulación de procesos es un instrumento para la cuantificación de parámetros de entrada, con respecto a su impacto en las salidas del modelo, y es útil no solo para el desarrollo del modelo sino también para la validación y reducción de la incertidumbre (Lenhart, *et al.*, 2002; Griensven *et al.*, 2006; Klemeš, 1986; Gan *et al.*, 2014 ).

Matemáticamente la dependencia de una variable “y” de un parámetro “x” es expresado por la derivada parcial  $\frac{dy}{dx}$ . Esta expresión es aproximada numéricamente por una diferencia finita; así, sea  $y_0$  una salida del modelo resultado de un valor inicial  $x_0$  del parámetro “x” (ver Figura 104). Este parámetro inicial es variado por  $\pm\Delta x$  arrojando  $x_1 = x_0 - \Delta x$  y  $x_2 = x_0 + \Delta x$  con los valores correspondientes de  $y_1$  y  $y_2$ . Así, la aproximación finita de la derivada parcial  $\frac{dy}{dx}$  es:

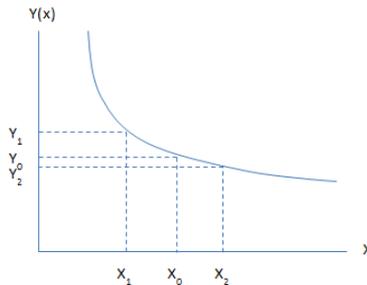


Figura 104. Relación entre una variable de salida del modelo “y” y un parámetro “x”.

$$S' = \frac{y_2 - y_1}{(x_0 + \Delta_x) - (x_0 - \Delta_x)} = \frac{y_2 - y_1}{2\Delta_x} \quad \text{Ec. 1}$$

Para obtener un índice adimensional, la anterior ecuación necesita ser normalizada como:

$$S = \frac{\frac{y_2 - y_1}{x_0}}{\frac{x_2 - x_1}{x_0}} \quad \text{Ec. 2}$$

Mientras más grande sea el valor de S, la sensibilidad del valor de salida al parámetro de entrada es mayor. Una vez que se conozcan los parámetros que presentan la mayor sensibilidad, se definirá entonces los parámetros a calibrar.

### Calibración

La calibración es el proceso con el que se ajustan de manera óptima los valores simulados y los observados, bajo esta idea general, la calibración se centrará en minimizar las diferencias entre estos datos (Cabrera, 2012). Otra definición, según Bonaldi *et al.* (2013) es el procedimiento de asignar valores a los parámetros en la búsqueda de la máxima coherencia entre el objetivo planteado y la herramienta que se utilizará.

Los criterios de eficiencia para valorar a un modelo de simulación son varios, por ejemplo, el coeficiente de determinación, índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe, índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe con valores logarítmicos, índice de congruencia, etc. (Krause *et al.*, 2005). En este documento, se emplearán el coeficiente de determinación, índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe y PBIAS, éste último mide la tendencia de la media de los datos simulados a ser mayores o menores que los datos homólogos observados (Moriassi *et al.*, 2007; Fallahzadeh, 2012). Las ecuaciones se presentan a continuación:

$$r^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) (P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right)^2 \quad \text{Ec. 3}$$

Donde  $r^2$  es el coeficiente de determinación,  $O_i$  es cada una de las  $i$  observaciones,  $P_i$  es cada uno de los  $i$  datos simulados,  $\bar{O}$  es la media de los datos observados,  $\bar{P}$  es la media de los datos simulados y  $n$  es el número total de observaciones.

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad Ec. 4$$

Donde *NASH* es el índice de Nash-Sutcliffe (adimensional), *O<sub>i</sub>* es cada una de las *i* observaciones, *P<sub>i</sub>* es cada uno de los *i* datos simulados,  $\bar{O}$  es la media de los datos observados y *n* es el número total de observaciones.

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{iobs} - Y_{isim}) * (100)}{\sum_{i=1}^n (Y_{iobs})} \right] \quad Ec. 5$$

Donde *PBIAS* es la desviación de los datos evaluados (%), *Y<sub>iobs</sub>* son los valores observados, *Y<sub>isim</sub>* son los valores simulados y *n* es el número total de observaciones.

El procedimiento de calibración que se describirá en este documento, a grandes rasgos, será el asignar valores a los parámetros de entrada involucrados en el escurrimiento, para acercarse a los valores ocurridos en la realidad. La calibración se puede realizar utilizando el interfaz de SWAT o bien, haciéndolo manualmente fuera del modelo.

El modelo cuenta con herramientas de análisis de sensibilidad y calibración. El uso de dichas herramientas será descrito en este apartado. Por otro lado, también se ejemplifica otra manera de realizar estos mismos análisis, fuera del modelo.

### Análisis de sensibilidad y calibración con el uso de herramientas de SWAT

Una vez que el modelo sea corrido, las opciones para realizar el análisis de sensibilidad, aun no se encontrarán activas (Figura 105).

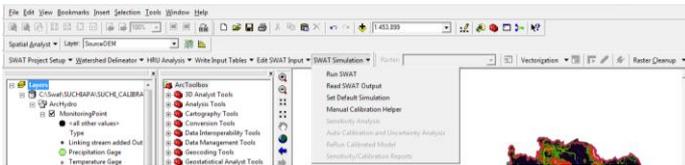


Figura 105. Opciones de análisis de sensibilidad inhabilitadas.

Para que las opciones aparezcan activadas, debe de guardarse la simulación que ya se ha corrido, esto se podrá realizar al dar clic en Read SWAT Output. Cuando la ventana de opciones de archivos de salida (Figura 106) sea desplegada en el apartado de

Save SWAT Simulation, colocar el nombre a la simulación inmediata anterior, y dar clic en Save Simulation.

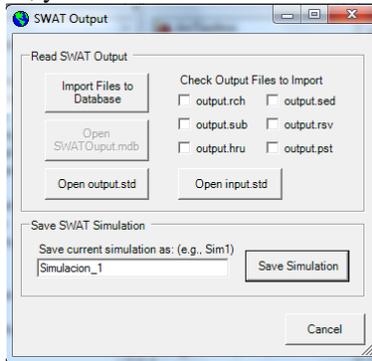


Figura 106. Ventana de opciones de archivos de salida de SWAT.

Cuando la simulación se guarde correctamente aparecerá un mensaje como el de la Figura 107.

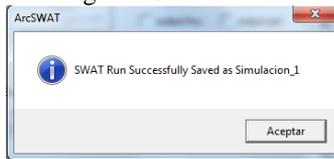


Figura 107. Mensaje de guardado exitoso de la simulación.

Una vez guardada la simulación, se activarán las opciones de Sensitivity Analysis y Auto Calibration and Uncertainty Analysis, tal como se muestra en la Figura 108.

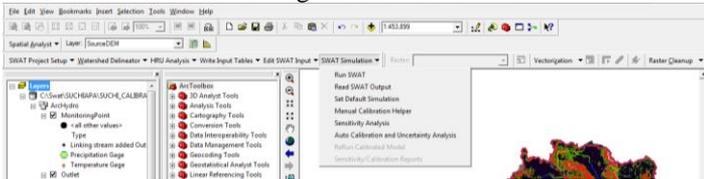


Figura 108. Opciones de Sensitivity Analysis y Auto Calibration and Uncertainty Analysis activas.

La opción de Sensitivity Analysis despliega una ventana como la que se muestra en la Figura 109, donde se encuentran dos pestañas, la primera donde se colocarán los datos de entrada (Sensitivity Analysis Input) y otra para los datos de salida del análisis de sensibilidad.

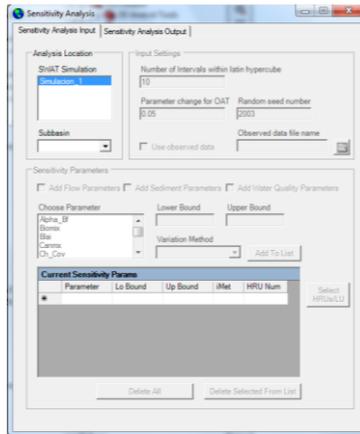


Figura 109. Ventana de opciones del análisis de sensibilidad.

En la ventana que se muestra en la Figura 109, en el apartado de Analysis Location seleccionar la simulación y la subcuena deseada, en Input Settings colocar el “number of intervals within latin hypercube” (número de intervalos del método de muestreo hipercono latino) “parameter change for OAT” (One factor At a Time, que se refiere al porcentaje de cambio que será aplicado al parámetro)”, el número de semilla y la opción para cargar el archivo con datos observados.

La extensión del archivo con datos observados debe ser “.DAT”, para elaborar dicho archivo, se recomienda realizarlo en excel, con las siguientes especificaciones: año en la primera columna con ancho de 5 espacios y cuatro dígitos, mes en la segunda columna con ancho de 2 espacios, y en la tercera se colocarán los datos observados con ancho de 11 espacios y 3 decimales.

Una vez cargado el archivo, se abrirá una ventana donde se podrá escoger el espaciamiento de las observaciones (Figura 110).

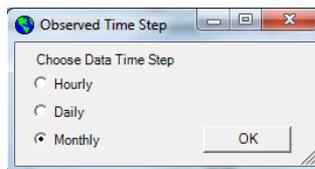


Figura 110. Ventana para elegir el espaciamiento de tiempo en datos observados.

La siguiente opción es en el apartado de Sensitivity Parameters, donde se pueden escoger los parámetros, ya sea de escurrimiento, de sedimentos o de calidad de agua. En dicho apartado (Figura 111), también es posible modificar los límites, tanto inferiores como superiores de cada uno de ellos.

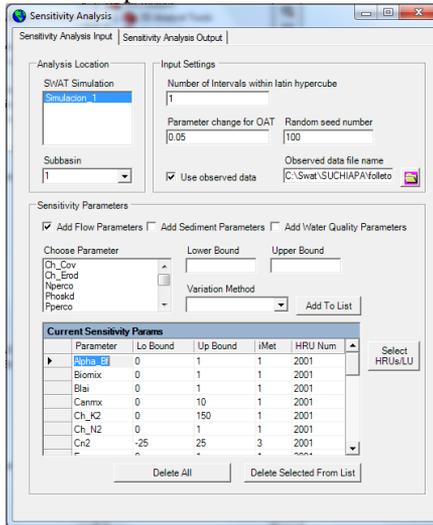


Figura 111. Opciones de Sensitivity Analysis Input.

Los parámetros de entrada de escurrimiento, producción de sedimentos y calidad de agua son los que se presentan en los Cuadros 1, 2 y 3, respectivamente.

Cuadro 1. Parámetros de entrada de SWAT involucrados en el escurrimiento.

Parámetro	Descripción
Alpha_Bf	Índice directo del flujo de aguas subterráneas en respuesta a cambios en la recarga.
Biomix	Eficiencia de mezcla biológica.
Blai	Potencial máximo de área foliar.
Canmx	Almacén máximo del dosel (mm H <sub>2</sub> O).
Ch_K2	Conductividad hidráulica efectiva en el canal principal (mm/hr).
Ch_N2	Valor de manning para el canal principal.

Cn2	Condición II de contenido inicial de humedad.
Epc0	Factor de compensación de retención de la planta.
Esc0	Factor de compensación de evaporación de agua del suelo.
Gw_Delay	Retraso de aguas subterráneas.
Gw_Revap	Coefficiente “revap” de aguas subterráneas.
Gwqmn	Umbral de profundidad del agua en el acuífero superficial para el flujo de retorno que se produzca.
Revapmn	Umbral de profundidad de agua en el acuífero de poca profundidad para que se produzca Revap (mm H <sub>2</sub> O).
Smfmix	Velocidad de fusión máxima de nieve durante el año (mm H <sub>2</sub> O/°C/day).
Smtmp	Temperatura de fusión de base de nieve (°C).
Sol_Alb	Albedo del suelo húmedo para diferentes capas.
Sol_Awc	Capacidad de agua disponible del primer perfil del suelo (mm/mm).
Sol_K	Conductividad de saturación hidráulica de la primera capa del suelo (mm/hr).
Sol_Z	Profundidad del perfil del suelo.
Surlag	Tiempo de retraso del escurrimiento superficial (días).
Timp	Factor de retraso de temperatura de nieve.
Tlaps	Gradiente de temperatura (°C/km).

**Cuadro 2. Parámetros de entrada de SWAT involucrados en la producción de sedimentos.**

Parámetro	Descripción
Ch_Cov	Factor de cobertura del canal.
Ch_Erod	Factor de erosión del canal.
Cn2	Condición II de contenido inicial de humedad.
Spc0n	Parámetro lineal para el cálculo de la cantidad máxima de sedimentos que se puede retener durante el enrutamiento de sedimentos del canal.
Spcxp	Parámetro exponencial para el cálculo de re-sedimento arrastrado en la zona de raíces.
Usle_C	Valor mínimo de USLE C para cobertura vegetal.
Usle_P	Factor de soporte práctico para la ecuación USLE.

Cuadro 3. Parámetros de entrada de SWAT involucrados en la calidad del agua.

Parámetro	Descripción
Cn2	Condición II de contenido inicial de humedad.
Nperco	Coefficiente de percolación de nitrógeno.
Phoskd	Coefficiente de partición del fósforo del suelo.
Pperco	Coefficiente de percolación de fósforo.
Rchrg_Dp	Factor de percolación del acuífero.
Shallst_N	Concentración de nitratos en el acuífero superficial.
Sol_Labp	Concentración inicial soluble de fósforo.
Sol_No3	Concentración inicial de nitrato.
Sol_Orgn	Nitrato orgánico inicial.
Sol_Orgp	Fósforo orgánico inicial.

En la pestaña de Sensitivity Analysis Output (Figura 112), en el apartado de Output Parameter Sensitivity se elige el parámetro de salida y el valor con el que se quiere hacer el análisis, ya sea la media o cualquier número elegido por el usuario (Average/Threshold Criteria), Concentration/Load Sensitivity (solo para calidad del agua). En cuanto al apartado de Observed vs. Simulated Sensitivity, donde se comparan los datos observados con los simulados, colocar el “Objective function” (suma de cuadrados de los residuos, este valor indica que el parámetro que genere el cambio porcentual más alto de la media en relación a este, será el más sensible), “OF Weight” y Concentration/Load sensitivity.

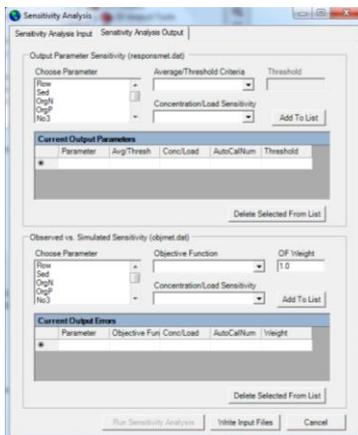


Figura 112. Apartado de Sensitivity Analysis Output.

Cuando la información necesaria sea **Write Input Files** se escribirán los archivos de entrada con el botón **Write Input Files**, y aparecerá un anuncio como el de la Figura 113.

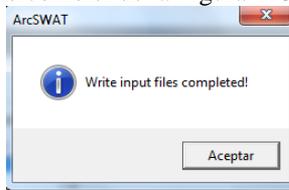


Figura 113. Mensaje que aparece después de escribir los archivos de entrada para el análisis de sensibilidad.

Después de la escritura de archivos de entrada, el botón de **Run Sensitivity Analysis** se mostrará activo, en el, dar clic para correr el análisis de sensibilidad. La ventana que indicará que el modelo está corriendo se puede ver en la Figura 114.

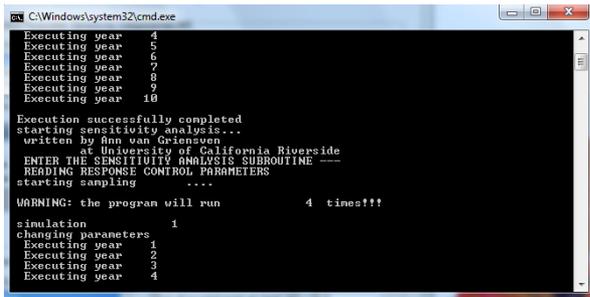


Figura 114. Ventana que indica que el análisis de sensibilidad está corriendo.

Debe de aparecer el mensaje de la Figura 115, que anuncia que corrió correctamente.

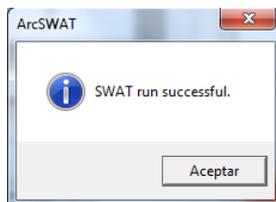


Figura 115. Mensaje que indica la corrida exitosa del análisis de sensibilidad.

Para ver los archivos resultantes, se elige la opción de Sensitivity/Calibration Report (Figura 116).

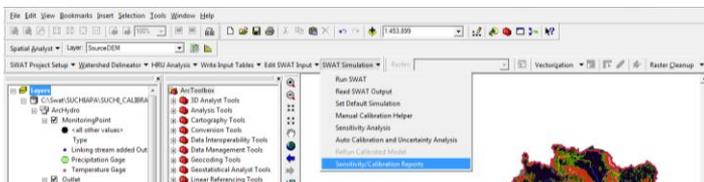


Figura 116. Opción para abrir los archivos de salida de sensibilidad y calibración.

Dar clic en esta opción para desplegar una ventana como la de la Figura 117, donde se pueden elegir tanto los archivos del análisis de sensibilidad como los de calibración.

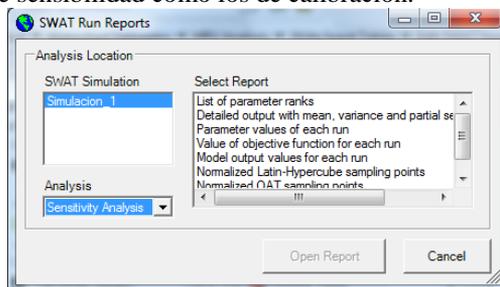


Figura 117. Archivos de salida del análisis de sensibilidad.

Otra forma de consultar los archivos de salida es en la carpeta de “Scenarios” con los nombres como los del Cuadro 4.

Cuadro 4. Nombre de archivos de salida del análisis de sensibilidad y descripción del contenido de cada uno.

Nombre	Información contenida
sensresult	Lista de rango de parámetros.
sensout	Salida detallada con media, varianza y sensibilidad parcial.
senspar	Valores de los parámetros para cada corrida.
sensobjf	Valor de la function objetivo para cada corrida.
sensrespons	Valores de salida del modelo para cada corrida.
lathyppar	Puntos de muestreo normalizados hipercubo latino.
outpar	Puntos de muestreo normalizados OAT.

Al final del análisis de sensibilidad se tendrá una lista con los parámetros ordenados, por ejemplo, en la Figura 118, el archivo de salida sensresult muestra el parámetro Cn2 como el mas sensible, seguido de Esco y en último lugar Epc0.

out	1	1	Cn2	3	Epc0	2	Esco

Figura 118. Archivo de salida sensresult.

Posterior al análisis de sensibilidad, se prosigue a la calibración del modelo, la primera opción es elegir Manual Calibration Helper (Figura 119).

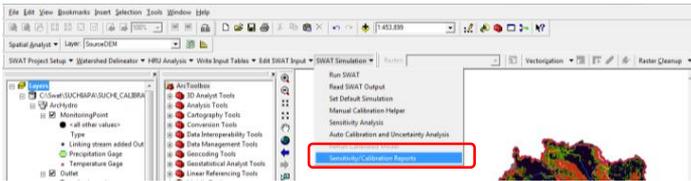


Figura 119. Opción de Manual Calibration Helper.

En la ventana de opciones de calibración manual que se ilustra en la Figura 120, seleccionar los parámetros que presentaron la mayor sensibilidad en el análisis anterior, el tipo de variación en los valores del parámetro elegido, bien sea suma, multiplicacion o remplazo; así mismo, se indicará la subcuenca donde se realizará el cambio, el uso de suelo, tipo de suelo y la pendiente. Al terminar de llenar todos los campos, dar clic en el botón  para actualizar el parámetro.

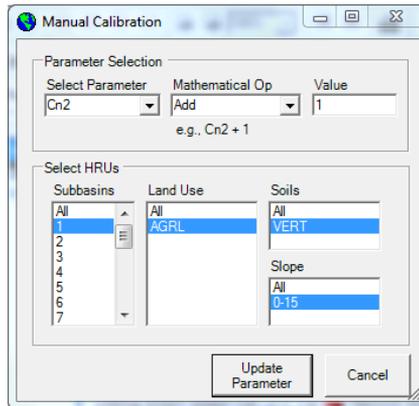


Figura 120. Ventana de opciones para realizar la calibración manual.

Después de dar clic en el botón ya citado y aparecer el mensaje Parameter Successfully Changed!, se realizará la corrida del programa, tal como se muestra en la Figura 100, y posterior a esto, se guardará como se indica en la Figura 106. Cada vez que se realice un cambio en el valor del parámetro será necesario guardar una simulación, hasta tener un número razonable de simulaciones (ver Figura 121). Cuando las simulaciones sean realizadas, comparar las salidas (output.std) fuera del programa (ver Figura 121) y determinar la eficiencia de predicción del modelo de acuerdo a las ecuaciones 3-5 y el capítulo de “Calibración fuera del modelo”.

nit > SUCHIAPA > CALIBRACION_3 > Scenarios >		A	B	C	D	E	F
Compartir con: Grabar Nueva carpeta							
Nombre	Fecha c						
Default	04/23/2						
simulacion_1	04/10/2						
simulacion_2	04/23/2						
simulacion_3	04/23/2						
simulacion_4	04/23/2						

	A	B	C	D	E	F
1						
2		SIMULACION_1	SIMULACION_2	SIMULACION_3	SIMULACION_4	
3	TIME	SURQ (mm)				
4						
5	1	0	0	0	0	0
6	2	0	0	0	0	0
7	3	0	0	0	0	0
8	4	0.51	0.55	0.72	0.89	
9	5	13.96	14.03	14.33	14.57	
10	6	50.68	50.86	51.62	52.26	
11	7	42.46	42.57	43.02	43.39	
12	8	20.87	20.97	21.43	21.62	
13	9	31.84	31.95	32.46	32.9	
14	10	57.96	58.08	58.63	59.09	
15	11	0	0	0	0	
16	12	0.12	0.12	0.12	0.12	
17	1	0	0	0	0	
18	2	0	0	0	0	
19	3	0	0	0	0	
20	4	0	0	0	0	
21	5	2.19	2.23	2.42	2.58	
22	6	63.26	63.49	64.48	65.29	
23	7	29.69	29.81	30.33	30.8	
24	8	38.08	38.16	38.51	38.81	
25	9	32.52	32.64	33.21	33.72	
26	10	0.12	0.12	0.12	0.14	
27	11	0	0	0	0	
28	12	0.17	0.18	0.23	0.27	

Figura 121. Carpetas de cada una de las simulaciones (izquierda) y sus respectivas salidas de escurrimiento superficial (derecha).

Otra forma de realizar la calibración, es en la opción de Auto-Calibration and Uncertainty, donde se colocan los datos de entrada y salida en las pestañas de Auto-Calibration Input y Auto-Calibration Output, respectivamente. En la pestaña de Auto-Calibration Input (Figura 122) seleccionar la corrida (simulación) de donde se tomarán los datos de entrada, así como la subcuena, MAXN (número máximo de ensayos después que la optimización es terminada), NGS (número de complejos en la población inicial), ISTAT (método estadístico), IGOC (indica que todas las funciones objetivo se leen en el archivo objmet.dat), KSTOP (número máximo de ciclos), ISEED, IPROB (umbral 1, 2 o 3 para ParaSol) y NINTVAL, el método de calibración y es donde se puede adjuntar el archivo con datos observados. Así mismo, se tiene la posibilidad de elegir el parámetro a calibrar deseado, como el límite superior e inferior de la variación del parámetro.

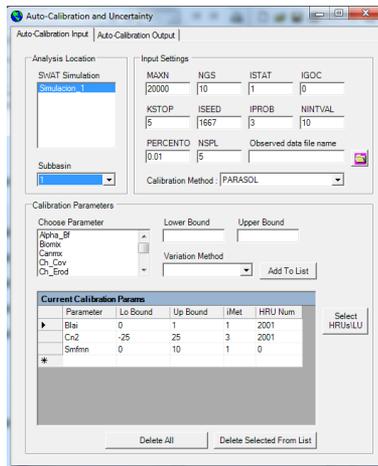


Figura 122. Pestaña de Auto-Calibration Input.

En la pestaña de Auto-Calibration Output (Figura 123) en el apartado de Calibration Output Evaluations se podrán escoger los parámetros de salida la función objetivo, OF Weight y Concentration/Load Sensitivity. En el apartado de Model Output Evaluations, se escoge el parámetro, el Average/Threshold criteria, Concentration/Load Sensitivity.

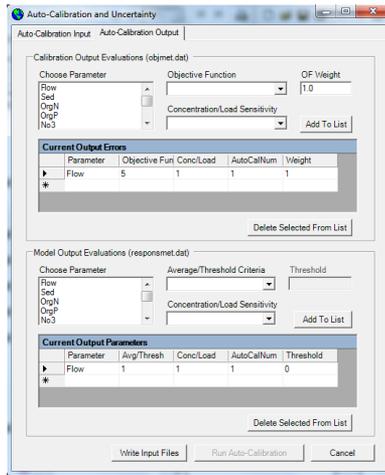


Figura 123. Pestaña de Auto-Calibration Output.

Damos clic en el boton **Write Input Files** e inmediatamente después aparecerá un mensaje que indica que los archivos se escribieron correctamente: **Write input files completed!**. Para correr la autocalibracion, presionar el boton **Run Auto-Calibration** y la pantalla de la Figura 124 aparecerá, que indica que el programa se encuentra corriendo.

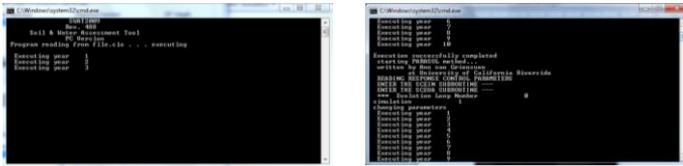


Figura 124. Pantalla que indica que la Auto-calibración está corriendo.

Los archivos de salida pueden ser consultados desde la ventana de SWAT Run Reports (ver Figura 117) solo que ahora se elige Auto-calibration.

**Cuadro 5. Nombre de archivos de salida de auto-calibración y descripción del contenido de cada uno.**

Nombre	Información contenido
sceobjf	Objective functions values for each optimization run.

scepar	Parameter values of all simulation runs.
parasolout	Detailed output for each optimization loop uncertainty.
goodpar	The good parameter values.
bestpar	The best parameter values.

En la opción de Re-Run Calibrated Model se permite al usuario correr nuevamente una simulación basada en el parámetro identificado durante la auto-calibración.

### Análisis de sensibilidad fuera del modelo

A continuación se explicará el análisis de sensibilidad al modificar la curva numérica para los 4 grupos hidrológicos, independientemente de que los datos del ejemplo parezcan aberrantes, así pues, se aclara que es solo con fines explicativos. En el Cuadro 6, se observan los cambios en la curva numérica, que van desde -10% a 10%.

Cuadro 6. Guía de cambios para realizar el análisis de sensibilidad.

	Variación de curva numérica				Variación (%)			
	A	B	C	D	A	B	C	D
1	60.3	69.3	74.7	78.3	-10	-10	-10	-10
2	67	77	83	87	0	0	0	0
3	73.7	84.7	91.3	95.7	+10	+10	+10	+10

Se realizaron corridas con las variaciones indicadas en el Cuadro 6 y se sugiere acomodar los datos de salida como en la Figura 125.

	A	B	C	D	E
4		MODELADO (0)	MODELADOS (+10)	MODELADO (-10)	SENSIBILIDAD
5	1	0	0	0	#DIV/0!
6	2	0	0	0	#DIV/0!
7	3	0	0	0	#DIV/0!
8	4	6.98	14.65	2.64	8.603151862
9	5	34.54	50.52	23.79	3.869426752
10	6	94.57	124.81	70.31	2.881463466
11	7	73.63	96.6	56.25	2.740051609
12	8	48.02	69.95	32.43	3.906705539
13	9	66.99	96.45	45.99	3.766233766
14	10	99.57	128.7	76.58	2.617254193
15	11	0	0	0	#DIV/0!
16	12	0.54	1.36	0.18	10.92592593
17	13	0	0	0	#DIV/0!
18	14	0	0	0	#DIV/0!
19	15	0.01	0.22	0	110

Figura 125. Ejemplo del manejo de datos para calcular sensibilidad fuera del modelo.

En la hoja de cálculo aplicar la ecuación siguiente.

$$Sr = \left(\frac{x}{y}\right) \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right)$$

Ec. 6

Donde  $Sr$  es la sensibilidad relativa;  $x$  es el parámetro de entrada;  $y$  es la variable de salida;  $x_1, x_2$ , corresponden a la variación en  $\pm 10\%$  del parámetro de entrada;  $y_1, y_2$  son los valores de salida resultantes de dicha variación.

El valor de sensibilidad que se obtenga mientras más grande sea más sensible será el parámetro, así se comparará con otros, para definir cual es más sensible.

### Calibración fuera del modelo

Para realizar la calibración fuera del modelo es de gran ayuda tener los parámetros más sensibles, resultado del análisis de sensibilidad dentro del modelo, descrito en el apartado anterior. A continuación se ejemplifica la calibración del escurrimiento superficial para realizar la calibración se debe contar con datos medidos de escurrimiento, y compararlos con los escurrimientos simulados para el mismo periodo de tiempo. Una vez que se haya corrido el programa, abrir el archivo de salida en la opción *Read SWAT Output* (Figura 126).

UNITE	PREC	SURQ	LATQ	GWQ	LATE	Q	SW	ET	PET	WAT
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	3.81	0.00	0.16	0.00	0.00	0.00	8.02	6.50	88.12	0.
2	7.38	0.00	0.77	0.00	0.00	0.00	7.39	7.17	65.33	0.
3	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.60	6.79	103.17	0.
4	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.90	178.60	0.
5	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	164.81	0.
6	8.98	0.00	0.98	0.00	0.00	0.00	1.12	5.85	166.73	1.
7	359.84	86.84	74.01	5.24	87.53	0.00	51.20	74.14	186.44	145.
8	187.54	24.96	42.97	42.58	54.48	0.00	35.79	85.03	110.58	210.
9	120.10	3.85	37.39	45.84	18.69	0.00	43.71	63.34	93.36	76.
10	12.79	0.07	0.75	32.13	0.11	0.00	19.54	34.40	86.79	32.
11	22.00	0.06	3.30	15.41	0.10	0.00	19.57	16.60	59.40	20.
12	46.16	8.05	21.53	5.50	4.46	0.00	20.68	11.10	47.67	34.
1991	768.75	103.84	77.88	147.10	165.36	0.00	20.68	311.82	1180.94	427.
SWAT Aug 23 2011	VER 2009/Rev. 488									
General Input/Output section (file.ctb):	19/04/2012 12:00:00 a.m. ARCGIS-SWAT Interface AV									
Annual Summary for watershed in year 2 of simulation										
UNITE	PREC	SURQ	LATQ	GWQ	LATE	Q	SW	ET	PET	WAT
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
1	101.76	6.25	25.55	4.72	15.93	0.00	50.11	23.40	43.32	36.
2	6.15	0.00	1.46	7.61	0.00	0.00	28.22	27.66	70.11	9.
3	11.97	0.08	3.95	5.10	0.25	0.00	16.26	19.77	100.12	9.
4	12.41	0.03	1.02	1.46	0.12	0.00	6.72	17.63	120.37	1.
5	29.64	0.01	3.90	0.50	0.00	0.00	3.66	30.88	133.83	4.
6	21.60	0.75	3.92	0.18	0.37	0.00	7.50	10.60	184.33	6.
7	130.37	4.18	12.34	0.49	10.22	0.00	52.00	47.27	133.07	26.
8	193.76	12.19	14.46	16.19	57.07	0.00	35.94	75.57	111.34	75.
9	95.28	7.45	19.80	27.94	24.57	0.00	41.07	55.53	111.48	54.
10	21.59	0.08	0.18	23.97	0.00	0.00	30.34	28.67	87.13	38.
11	7.27	0.01	7.01	11.34	0.00	0.00	21.70	14.18	58.64	13.
12	9.91	0.16	2.60	2.91	0.24	0.00	18.14	9.31	50.08	6.
1992	641.47	102.18	102.18	102.18	109.61	0.00	18.14	361.06	1184.04	274.
SWAT Aug 23 2011	VER 2009/Rev. 488									
General Input/Output section (file.ctb):	19/04/2012 12:00:00 a.m. ARCGIS-SWAT Interface AV									
Annual Summary for watershed in year 3 of simulation										

lamina mm	CALCULADOS
1.3172361	0
0.6341875	0
0.570447	0
0.315485	0
0.1564356	0
0.1003359	0
70.847438	66.84
97.726616	24.96
11.2	3.85
9.3724639	0.07
3.4170525	0.06
20.999772	8.05
34.368985	6.25
9.23291854	0
2.3525664	0.08
0.8537604	0.03
0.6723916	0.01
0.4652853	0.75
0.8883451	4.18
17.791434	12.19
11.626504	7.45
1.4264193	0.08

Figura 126. Archivo de salida de SWAT (izquierda) y archivo de Excel para hacer la correlación entre datos simulados y observados (derecha).

Los datos de escurrimiento simulados (SURQ) en el archivo de salida serán evaluados con base en las ecuaciones ya mencionadas.

## LITERATURA CITADA

- Allen, R. G., L. S. Raes D. y Smith, M. 2006. Evapotranspiración del cultivo: guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Riego y Drenaje. Volumen 56 de estudio FAO. Roma. 298 pp
- Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B., Neitsch, S. L. 2009. Soil and Water Assessment Tool Input/Output File Documentation Version 2009. Grassland, Soil and Water Research Laboratory – Agricultural Research Service. Blackland Research Center – Texas AgriLife Research. Texas Water Resources Institute.
- Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. S. Muttiah, and J. R. Williams. 1998. Large-area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model development. J. American Water Resour. Assoc. 34(1):73-89
- Arnold, J.G., J.R., Williams, A. D. Nicks y N.B. Sammons. 1990. SWRRB: A Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Managment. College Station: Texas A & M University Press.
- Arnold, J. G., J. R. Williams, and D. R. Maidment. 1995. Continuous-time water and sediment-routing model for largebasins. J. Hydrol. Eng. ASCE 121(2): 171-183.
- Bonaldi, P., Prada, J. D., González, A., Rodríguez, D. y Rojas, L. E. 2013. Método numérico para la calibración de un modelo DSGE. Revista Desarrollo y sociedad. Vol. 68. pp 119-156.
- Cabrera, J. 2012. Calibración de modelos hidrológicos. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Civil. Fecha de consulta: 16/04/2013  
[http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas\\_interes/modhidro\\_2.pdf](http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf)
- Fallahzadeh, H. 2012. New software for computation sensitivity analysis to detect hidden bias for partially order set test

- statistic in observational studies. *Procedia Technology* 1:225-229
- Gan, Y., Duan, Q., Gong, W., Tong, C., Sun, Y., Chu, W., Ye, A., Miao, C., Di, Z. 2013. A comprehensive evaluation of various sensitivity analysis methods: A case study with a hydrological model. *Environmental Modelling & Software*. 51:269-285
- Gitau, M., I. Chaubey, E. Gbur, J.H. Pennington, and B. Gorham. 2010. Impacts of land-use change and best management practice implementation in a Conservation Effects Assessment Project watershed: Northwest Arkansas. *Journal of Soil and Water Conservation* 65(6):353-368, doi:10.2489/jswc.65.6.353.
- Gottfried, B. S. 1984. *Elements of stochastic process simulation*. Prentice-Hall Inc. 99 8-10.
- Griensven, A., Meixner, T., Grunwald, S., Bishop, T., Diluzio, M. y Srinivsan, R. 2006. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology* 324: 10-23 p
- Green, W.H. y G. Ampt. 1911. Studies of soil physics, part I – the flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Science* 4:1-24.
- Haan, C. T. 1982. *Statistical Methods in Hydrology*. The Iowa State University Press. 378 pp.
- Klemeš, V. 1986. Operational testing of hydrological simulation models. *Hydrological Sciences Journal*, 31:1,13-24
- Krause, P., Boyle, D.P., Bäse, F. 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences*, 5, 89-97
- Law, A. M. And Kelton, W. D. 1982. *Simulation Modeling and Analysis*. Mc. Graw Hill Book Co., Inc. New Cork, N.Y.
- Lenhart T., K. Eckhardt, N. Fohrer and H.-G. Frede. 2002. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis. *Physics and Chemistry of the Earth* 27; Pp 645–654
- Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D. y Veith, T. L. 2007. Model evaluation

- guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*. Vol. 50(3):885-900
- NRC. 1999. *New Strategies for America's Watersheds*. National Academy Press. 311 pp.
- Sánchez, C. I. 1994. *Evaluating dessert strip farming system in arid ecosystems. A Stochastic Approach*. PhD Dissertation. The University of Arizona. E.U.A. 111 pp
- Sánchez, C. I. 2005. *Fundamentos para el aprovechamiento integral del agua. Una aproximación de simulación de procesos*. Libro científico No. 2 INIFAP CENID RASPA 272 pp.
- Sánchez, C. I., J. L. Gozález B., G. Díaz P., W. Ojeda B., A. Muñoz V., M.A. Velasquez V. y G. Gozález C. 2007. *Modelo Conceptual en el Manejo Integral del Agua*. En: *Procesos Hidrológicos en Zonas Áridas y Semi Áridas: De la Investigación a la Acción*. I. Sánchez Cohen y Ghani Chebouni, Eds. Gomez Palacio Durango, México. Pp 1-20
- Sánchez C. I., M. A. Velásquez V., E. Catalán V., M.A. Inzunza I., G. Esquivel A., P. Bueno H. y G. Díaz P. 2013. *Modelo de balance hídrico como apoyo a toma de decisiones en zonas agrícolas bajo incertidumbre climática*. Folleto Técnico No. 28. INIFAP CENID RASPA. Gómez Palacio Durango, México. 53 pp
- Sánchez C. I., Arriaga, G.E., Valle, M.A.V., Ibarra, M.A.I., Villalobos, A.M. and Hurtado, P.B. 2014. *Climate Based Risk Assessment for Maize Producing Areas in Rainfed Agriculture in Mexico*. *Journal of Water Resource and Protection*, 6, 1228-1237. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2014.613112>
- SEI (Stockholm Environment Institute). 2007. *WEAP (Water Evaluation And Planning System) User Guide for WEAP 21*. Curtis Avenue Somerville, MA. USA
- Singh, V. P. 1992. *Hydrologic Systems*. Vol. II. *Watershed Modeling*. Prentice Hall. 320 pp.
- Singh, V. P. 1996. *Kinematic wave modeling in water resources*. *Surface Water hydrology*. John Wiley & Sons, Inc. 357 pp.

- Singh, V. P. and B. Kumar. Surface Water Hydrology. 1993. Proceedings of the international conference on hydrology and water resources, Singh, V. P. and B. Kumar eds. New Delhi, India.
- Wilks, D. S. 1995. Statistical Methods in the Atmospheric Sciences. Department of Soil Crop and Atmospheric Sciences. Academic Press. Ithaca New York. 467 pp.
- Williams, J.R. 1992. WXPARM: Weather parameter calculator for EPIC. User Manual. U.S. Department of Agriculture. Grassland Soil and Water Research Laboratory, Texas. 6 pp.
- Winchell, M., Srinivasan, R., Di Luzio, Arnold. 2010. ArcSWAT Interface for SWAT2009, Users Guide. Blackland Research and Extension Center. Texas AgriLife research. Grassland, Soil and Water Research Laboratory. USDA Agricultural Research Service. 720 East Blackland Road – Temple, Texas 76502

## AGRADECIMIENTOS

El presente estudio fue financiado por la FUNDACION  
PRODUCE DURANGO A. C., a través del Proyecto:

“Validación de sistemas de labranza para zonas de escaso régimen pluviométrico en el cultivo de maíz en la región de San Luis del Cordero, Dgo. así como la evaluación hidrológica de trabajos de captación de agua de lluvia en esa región”.

(Clave 563)



## COMITÉ EDITORIAL DEL CENID-RASPA

Presidente: Dr. José Antonio Cueto Wong  
Secretario: Dr. Miguel A. Velásquez Valle  
Vocales: Dr. Juan Estrada Ávalos  
M.C. Miguel Rivera González

Revisores Técnicos:

Armando López Santos  
Elsa Marcela Ramírez López

Edición y Diseño:

Palmira Bueno Hurtado

La presente publicación se terminó de imprimir en Diciembre de 2014 en la imprenta Carmona Impresores. Calzada Lázaro Cárdenas No. 850, Col. Eduardo Guerra, Torreón, Coahuila. Su tiraje consta de 510 ejemplares.

CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN  
DISCIPLINARIA RELACIÓN AGUA-SUELO-PLANTA-ATMÓSFERA

DR. JOSÉ ANTONIO CUETO WONG

Director

ING. ARMANDO ESTRADA GONZÁLEZ

Jefe de Operación

LIC. FLOR CARINA ESPINOZA DELGADILLO

Jefe Administrativo

PERSONAL INVESTIGADOR

Bueno Hurtado Palmira

Catalán Valencia Ernesto Alonso

Cerano Paredes Julián

Constante García Vicenta

Delgado Ramírez Gerardo

Esquivel Arriaga Gerardo

Estrada Ávalos Juan

González Barrios José Luis

González Cervantes Guillermo

Inzunza Ibarra Marco Antonio

Jacobo Salcedo Rosario

Muñoz Villalobos Jesús Arcadio

Potisek Talavera María del Carmen

Rivera González Miguel

Román López Abel

Sánchez Cohen Ignacio

Trucíos Caciano Ramón

Velásquez Valle Miguel Agustín

Villa Castorena María Magdalena

Villanueva Díaz José

# WWW.INIFAP.GOB.MX

La incertidumbre en la disponibilidad del agua para todos los usos está fuertemente ligada a la variabilidad climática, el incremento poblacional y a la creciente demanda de bienes y servicios. El análisis de impacto y diseño de procesos de mitigación, requieren así, de aproximaciones que contemplen diversos escenarios de disponibilidad para lo cual es necesario el uso de modelos de simulación de procesos. La simulación de procesos es una actividad con la cual el usuario puede obtener conclusiones relativas al comportamiento de un sistema dado por medio del estudio de un modelo cuya relación causa-efecto es la misma (o similar) a la del sistema original.

Las razones del porqué utilizar la simulación de procesos para la solución de problemas se pudieran agrupar en dos grandes categorías: 1) como herramienta de investigación y 2) como herramienta para el soporte de decisiones.

En la presente obra se aborda el uso de modelos de simulación de procesos hidrológicos puntualizando en la descripción de dos modelos de uso común en la literatura: SWAT y WEAP. El primero vinculado a la simulación de la relación causa efecto de varios procesos hidrológicos y el segundo presenta su máxima utilidad para la gestión de los recursos hidráulicos. Se hace énfasis en el análisis de sensibilidad como mecanismo de evaluación de modelos.