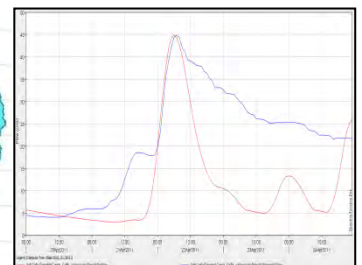
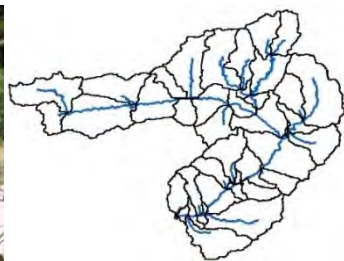


Guía práctica sobre la modelización hidrológica y el modelo HEC-HMS

Juan Antonio Pascual Aguilar

Mario Díaz Martín



Serie: Cuadernos de Geomática

4. Guía práctica sobre la modelización hidrológica y el modelo HEC-HMS

Series: Notes on Geomatics

4. *A Practical guide on hydrological modeling and the HEC-HMS model*

Centro para el Conocimiento del Paisaje

Calle Rocha del Cine 41, 12415 Matet, Castellón

CIVILSCAPE

Villa medicea di Careggi, Viale G. Pieraccini, 15, 50139, Firenze, Italy

Instituto IMDEA Agua

Avenida Punto Com, nº 2, Parque Científico Tecnológico de la Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares. 28805 Madrid

Alcalá de Henares

2016

ISBN: 978-84-617-7002-1

Los autores

Juan Antonio Pascual Aguilar

Licenciado en Geografía e Historia por la Universidad de Valencia en 1991 y doctorado en Geografía por la misma Universidad en 2002. Desde la obtención del título de doctor ha realizado distintos tipos de trabajo relacionados con la gestión de recursos, la degradación de suelos por medio del sellado antropogénico, el análisis espacial de procesos en suelos y agua y el análisis de la dinámica de usos del suelo utilizando técnicas espaciales con Sistemas de Información Geográfica.

Sus principales temas de investigación se centran en la aplicación de técnicas Geomática a los recursos hídricos y edáficos, destacando sus contribuciones sobre inventario, evaluación, puesta en valor y análisis espacial del patrimonio y paisajes culturales, la evaluación espacio-temporal de la incidencia de los usos del suelo en las propiedades productivas e hídricas del territorio y la aplicación de modelos para analizar el comportamiento hidrológico de cuencas ante distintos escenarios de cambio.

Colabora en distintos organismos dedicados a la investigación, la divulgación del conocimiento y la docencia, entre los que cabe destacar el Instituto Imdea-Agua, el Centro de Investigaciones sobre Desertificación, el Centro para el Conocimiento del Paisaje y la Universidad de Valencia.

Mario Díaz Martín

Licenciado en Ciencias Ambientales por la Universidad Rey Juan Carlos en 2004, ha ido completando su formación con los títulos de Ingeniería Técnica de Obras Públicas por la Universidad Politécnica de Madrid en 2012, Ingeniería Civil por la Universidad Politécnica de Madrid en 2014 y Máster en Hidrología y Gestión de Recursos Hídricos por la Universidad de Alcalá en 2016.

Ha desarrollado toda su trayectoria profesional en el área de Agua y Medio Ambiente de la empresa de ingeniería EGIS EYSER, participando en numerosos proyectos dentro del ámbito del agua, tales como estudios hidrológicos, conducciones de abastecimiento, saneamiento y riego, depuración, definición del Dominio Público Hidráulico, estudios hidroeléctricos, etc. Además, ha intervenido en diversos proyectos de infraestructuras viarias (carreteras y ferrocarriles) elaborando estudios de drenaje.

PREFACIO

El número 4 de la serie de Cuadernos de Geomática es en realidad una guía práctica. Ante la necesidad que en ocasiones tenemos de conocer la dinámica de la escorrentía en cuencas de drenaje, sobre todo en su forma de caudal, se han ido desarrollando una serie de enfoques, cada vez más sofisticados, de análisis basados en el uso de modelos hidrológicos.

Sin embargo, en el proceso histórico de su desarrollo, los modelos se han ido haciendo cada vez más complejos, de manera que hoy en día no sólo es necesario tener un cierto conocimiento del significado y alcance de uso que pueden tener los modelos hidrológicos de manera general e independientemente de su tipo y características, sino que también son instrumentos relativamente complejos que requieren un cierto conocimiento y aprendizaje como herramientas que pueden ayudarnos a resolver algunas cuestiones relacionadas con la gestión hídrica de las cuencas y experimentar ante situaciones de previsión y planteamiento de escenarios posibles, aunque no necesariamente reales.

La presente guía pretende cubrir ambas necesidades. Se ha dividido en dos secciones. En la primera se abordan los principales conceptos relacionados con la modelización hidrológica superficial. En ella se tiene en cuenta las características, tipologías, definiciones y estructuras de los modelos, distinguiéndose entre modelos de flujo (los que tratan únicamente el caudal) y de transporte (los que además del caudal analizan algún tipo de material arrastrado y/o contenido en el agua). En esta primera parte también se describen de manera sucinta algunos de los modelos más conocidos sean de flujo (MIKE-SHE, HEC-HMS, TETIS) como de transporte (SWAP, AnnAGNPS, WEPP).

La segunda parte se dedica, única y exclusivamente, al uso del programa HEC-HMS (HydrologicEngineering Center), desarrollado en el US Army Corp of Engineers. Diseñado a modo de tutorial de autoaprendizaje, se detallan profusamente todos los pasos que se deben seguir desde la configuración del modelo hasta la consecución final de resultados, pasando por todo el tratamiento que se debe dar a los datos iniciales para que pueden ser representados adecuadamente por la aplicación. Para aquellos que quieran seguir el procedimiento de modelización planteado en esta segunda parte, se ha incluido también la información digital de partida requerida por el modelo HEC-HMS.

Índice de contenidos

PARTE 1: La modelización hidrológica

1. Introducción	1
2. Definiciones y características de los modelos hidrológicos	1
2.1. ¿Qué es un modelo hidrológico?	1
2.2. Tipos y clasificación de los modelos	4
2.3. Modelos: desarrollo y procedimiento de aplicación	6
2.3.1. Proceso de desarrollo de un modelo	6
2.3.2. Su aplicación: protocolo de modelado	7
3. Modelos de flujo (escorrentía)	8
3.1. Características de los modelos de flujo	8
3.1.1. Estructura	8
3.1.2. Modelado	10
3.2. Aplicaciones de los modelos de flujo	11
3.3. Descripción de algunos modelos de flujo	12
3.3.1. MIKE SHE	12
3.3.2. HEC-HMS	13
3.3.3. TETIS	14
4. Modelos de transporte	16
4.1. Características de los modelos de transporte	16
4.1.1. Estructura	16
4.1.2. Modelado	17
4.2. Aplicaciones de los modelos de transporte	18
4.3. Descripción de algunos modelos de transporte	18
4.3.1. SWAT	19
4.3.2. AnnAGNPS	19
4.3.3. WEPP	20
5. Algunos comentarios finales	20
6. Referencias bibliográficas	21
7. Anexos	24
7.1. Anexo i: características de 19 modelos hidrológicos de flujo	25
7.2. Anexo ii: características de 11 modelos hidrológicos de transporte	28

PARTE 2: La aplicación práctica del modelo HEC-HMS

1. Introducción	34
2. Enunciado del ejercicio	34
3. Planteamiento del ejercicio	34
4. Descripción del modelo HEC-HMS	34
4.1. Modelo de cuencas (Basin Model)	35
4.2. Modelo Meteorológico (Meteorologic Model)	36
4.3. Especificaciones de Control (Control Specifications)	36
5. Datos de partida	36
5.1. Modelo Digital del Terreno	37
5.2. Mapa de cauces	37
5.3. Mapa de usos del suelo del CORINE	37
5.4. Mapa de grupos hidrológicos	37
5.5. Localización de estaciones meteorológicas	37
5.6. Hietogramas de diseño	38
5.7. Escorrentía total anual	38
5.8. Correspondencia de usos del suelo entre CORINE y SCS	38
5.9. Asignación de valores de Número de Curva	38
5.10. Secciones transversales del cauce	38
5.11. Tormenta registrada	39
6. Tratamiento de los datos de partida	39
6.1. Pasos previos	39
6.2. Definición de las características de la cuenca y las subcuencas	40
6.2.1. Delimitación previa de subcuencas y líneas de drenaje	40
6.2.2. Delimitación definitiva de la cuenca y las subcuencas	47
6.2.3. Definición de las características físicas de la cuenca y las subcuencas	56
6.2.4. Definición de los parámetros hidrológicos	58
6.2.5. Definición de las entradas a HEC-HMS	60
6.3. Resumen de las características de las subcuencas	66
6.4. Cálculo del Flujo Base	70
6.5. Cálculo del Número de Curva de las subcuencas	74
6.5.1. Elaboración de mapa de pendientes	74
6.5.2. Elaboración de mapa de usos del suelo	78
6.5.3. Elaboración de mapa de grupos hidrológicos	81
6.5.4. Asignación de valores del método de números primos	81
6.5.5. Asignación de valores de Número de Curva	84
6.6. Definición de la geometría de los cauces	87
6.7. Definición de los hietogramas	92
7. Elaboración del modelo HEC-HMS	93
7.1. Creación del modelo HEC-HMS	93
7.2. Modelo de cuenca (Basin Model)	95
7.2.1. Caracterización de las subcuencas	95
7.2.2. Caracterización de los tramos	98
7.2.3. Caracterización de las confluencias	103
7.2.4. Caracterización de la salida	104
7.3. Modelo meteorológico (Meteorologic Model)	105
7.4. Especificaciones de control (Control Specifications)	113
8. Calibración	114
9. Simulación	136
10. Reflexiones finales	141
11. . Bibliografía	142

PARTE 1: La modelización hidrológica

1. Introducción

Los modelos hidrológicos son herramientas muy útiles para la comprensión del funcionamiento de una cuenca de drenaje, siendo una consecuencia lógica en el intento por conocer los procesos de conversión de la precipitación en escorrentía y, también, de la capacidad del agua para transportar sustancias. Los modelos de última generación se definen por ser “integradores”, entendiendo esto como un enfoque del modelado con el que se pretende incorporar información diversa y con el mayor detalle de representación del medio que se modela. Si bien desde hace ya bastantes décadas se han ido desarrollando un continuo de procedimientos para la estimación de la escorrentía basados en el concepto del Hidrograma Unitario que pueden considerarse como formas incipientes de modelizar de manera sintética los procesos de transformación de la precipitación en escorrentía dentro de una cuenca, los modelos que aquí se tratan son formas más complejas que tienen en cuenta la diversidad de los procesos que concurren para producir caudal. Este tipo de modelos han sido desarrollados más recientemente, a partir de los años 70 del Siglo XX; son también de naturaleza distribuida, con representación espacial de los procesos que ocurren en la cuenca.

En consecuencia, esta primera parte dedicada a la “modelización hidrológica” se centra exclusivamente en los modelos de escorrentía superficial y se ha dividido en tres secciones:

La primera de ellas contextualiza el modelado hidrológico prestando atención sobre todo a una serie de conceptos (incluida la definición de modelo (s) hidrológico (s), su tipología, desarrollo y forma de uso), que ayuden a familiarizarnos con sus propiedades y características.

La segunda sección se dedica exclusivamente a los modelos de flujo (o de escorrentía superficial). En ella se explican, en primer lugar, sus principales características y los tipos generales de modelos. A continuación se trata de las aplicaciones más comunes que se realizan con ellos. El último apartado describe algunos de los modelos más comunes y accesibles.

La tercera sección sigue una estructura similar a la sección anterior pero, en este caso, se dedica a los modelos hidrológicos de transporte,

haciéndose hincapié en sus principales características y tipología, aplicaciones y descripción de modelos.

2. Definiciones y características de los modelos hidrológicos

Desde sus inicios los modelos desempeñan un papel importante en muchas áreas de la hidrología. Por ejemplo, su aplicación es común en la previsión de la alarma temprana de riesgos de avenidas e inundaciones, la gestión y planificación de cuencas, en la agricultura, en el diseño de infraestructuras como pantanos y presas, los estudios de impacto del cambio climático, etc.

Sin embargo, más allá de la aplicación directa de los modelos ya consolidados y fiables, son también instrumentos propios de la investigación y la ampliación del conocimiento, pues ayudan a la formalización de la comprensión científica de un sistema hidrológico por medio del planteamiento de escenarios, el análisis de las interrelaciones entre sus componentes y la proyección de situaciones hipotéticas de cambios, presentes y futuros.

Debido a que los modelos llevan más de un siglo de desarrollo y ampliación de sus aplicaciones y postulados, éstos han ido creando un cuerpo propio de términos y conceptos que es necesario familiarizarse con ellos; por lo tanto, este apartado se dedica a su explicación desde tres aspectos:

- La definición de modelo hidrológico y términos asociados con el proceso de modelado.
- La tipología y características de los modelos.
- La estructura de construcción y procedimiento a seguir en su aplicación.

2.1. ¿Qué es un modelo hidrológico?

Se puede definir modelo como una representación simplificada del mundo real, que permite tener una idea de lo que ocurre bajo ciertas circunstancias. Los modelos hidrológicos intentan representar los diferentes procesos que se dan dentro de un espacio (generalmente una cuenca) y que transforman, en principio, una precipitación en escorrentía.

Si sustituimos mundo real por sistema complejo, entonces un modelo es una representación simplificada de un sistema complejo. Un modelo siempre describe los componentes básicos y más importantes de un sistema complejo, por lo tanto, un modelo trata de representar cierta semejanza y algunas, pero no todas, características del sistema real que simula.

Desde un punto funcional, una cuenca de drenaje puede ser considerada como un sistema hidrológico. En esta conceptualización, las condiciones de límite del sistema están dibujadas alrededor de la cuenca: estos límites se establecen al considerar la cuenca como un elemento aislado de manera que sus divisorias se extienden verticalmente, hacia arriba y hacia abajo, mediante la proyección de la divisoria de

aguas entre cuencas, y por medio de planos horizontales en sus límites superior e inferior (figura 1).

De esa manera, la precipitación incidente es la entrada al sistema, y queda definida como la distribuida en el plano superior del espacio de la cuenca; el caudal es la salida, y es el resultante de la interacción de los distintos planos dentro de los límites de la cuenca: el flujo que se concentró en el espacio del sistema hidrológico y se cuantifica a la salida de la cuenca. La evaporación y el flujo subsuperficial también son salidas, pero si no intervienen como componentes que contribuyen al caudal modelado, se consideran pérdidas que escapan de los límites de la cuenca.

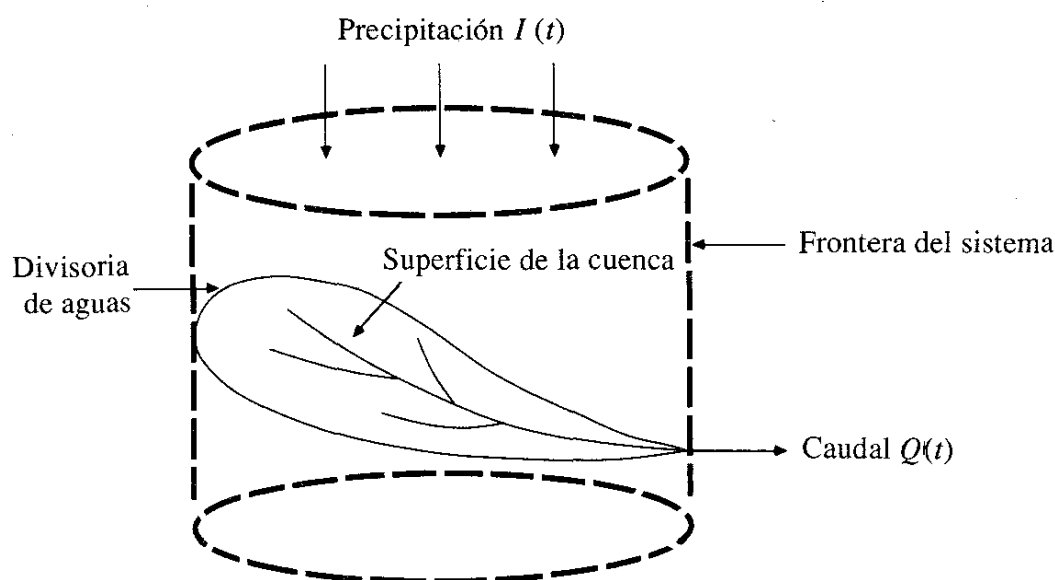


Figura 1. La cuenca de drenaje como sistema hidrológico.

Fuente: Chow et al. (1994, p 8)

Al utilizar el concepto de sistema, el esfuerzo de simplificación del mundo real está dirigido a la construcción de un modelo de relación de entradas y salidas en lugar de a la más compleja (por imposible) tarea de la representación exacta de los datos del sistema, que puede no ser significativo desde el punto de vista práctico. No hay que olvidar que el objetivo de un modelo y del análisis del sistema hidrológico es estudiar y comprender su funcionamiento de manera que se pueda predecir su salida: un modelo del sistema hidrológico es una aproximación del

actual sistema; sus entradas y salidas son variables hidrológicas medibles y su estructura se basa es el concepto de simplificación del sistema.

En su visión más esquemática, la representación de la cuenca como sistema a modelar y la estimación de la escorrentía producida en ella en su flujo de salida (hidrograma), puede relacionarse como un proceso agrupado en tres fases: precipitación (entradas), procesos intermedios producidos en el sistema hidrológico y producción de caudal (salidas) (figura 2).

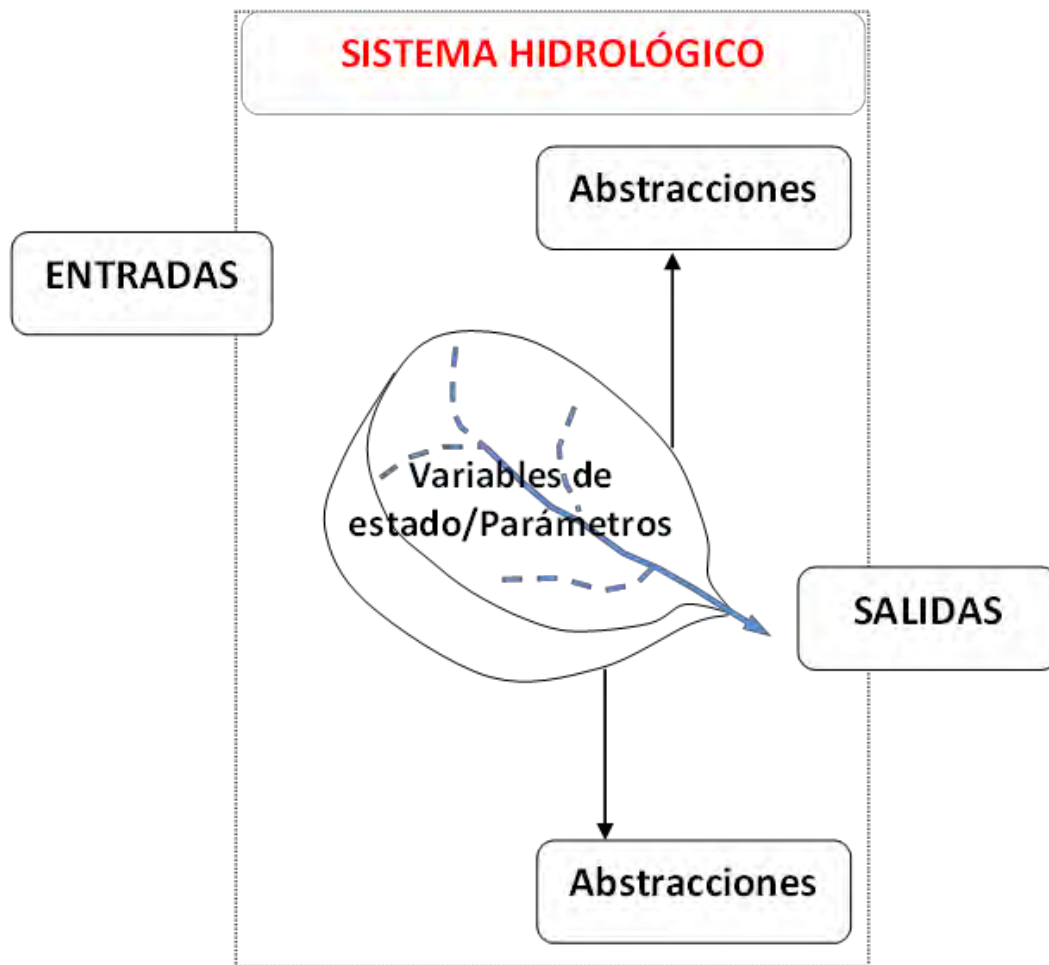


Figura 2. Representación esquemática de los procesos producidos en una cuenca de drenaje.

Los paulatinos avances del modelado hidrológico se han centrado en la ampliación de esa simplificación, sobre todo en la comprensión de los procesos intermedios y su relación entre las entradas y las salidas al sistema. Ello ha hecho que, y sobre todo a partir del momento de la incorporación de las nuevas tecnologías informáticas al proceso de modelado, se haya ido creando un vocabulario propio, con sus términos y conceptos, el cual es conveniente conocer:

➤ **Variable:** se entiende como una característica de un sistema que puede ser medida, que asume diferentes valores cuando se mide en diferentes momentos. Precipitación, escorrentía, evaporación, temperatura, infiltración, son algunos ejemplos de variables incorporadas a un

modelo hidrológico. Se distinguen tres tipos de variables:

- **Variable de entrada:** se refiere a la componente inicial del sistema sobre el que se construye un modelo. En el caso de un modelo hidrológico, la precipitación es la variable de entrada a considerar.
- **Variables de estado:** corresponden a la cantidad de materia o energía almacenada en cada uno de los componentes (subsistemas) que forman parte del sistema; por ejemplo, niveles de humedad en el subsistema suelos de un modelo hidrológico.
- **Variables de salida:** componente final considerada en el proceso de modelado, el caudal en un modelo hidrológico.

- **Abstracciones:** por abstracciones se entienden las paulatinas pérdidas (o almacenamientos) del flujo del agua desde que esta entra en la cuenca hasta que sale como caudal. Algunas de estas abstracciones se producen en los procesos de evaporación, almacenamiento en superficie, infiltración y percolación del agua a capas profundas.
- **Parámetros:** Valores numéricos que se asignan a los distintos componentes del modelo hidrológico. Pueden estar resueltos por asignaciones numéricas directas como también por su derivación utilizando formulación matemática.
- **Flujos:** indican el proceso de transmisión entre los distintos subsistemas hidrológicos que establece el modelo por medio de la cantidad de materia o energía que viaja de un componente a otro en un intervalo determinado de tiempo. Afectan por tanto a los niveles, llenando unos (flujos de entrada) y vaciando otros (flujos de salida).
- **Condiciones iniciales:** valores iniciales de las variables a partir de los cuales se establece el proceso de modelado y los flujos entre subsistemas.

2.2. Tipo y clasificación de los modelos

Los modelos hidrológicos se pueden clasificar de múltiples maneras, teniendo en cuenta criterios como el enfoque matemático que realizan, el grado de representación espacial de sus componentes, etc. Si bien es cierto que en la mayoría de los casos los modelos se describen por la forma o detalle que tienen de representar la superficie de la cuenca (agregados, semidistribuidos y distribuidos), el enfoque matemático (deterministas y estocásticos) y la forma de plantear los procesos hidrológicos que analiza (de base física o empírica), a continuación se describen las características que se pueden dar en los modelos de acuerdo con la clasificación y tipología interrelacionada (figura 3) ofrecida por Singh (1988):

- **Modelos materiales.** Un modelo material es la representación del sistema por otro sistema, que tiene características similares,

pero es mucho más fácil para trabajar que con el real:

- Porque se cambia de escala a un tamaño asequible por el modelador (una maqueta) y se instala y experimenta en laboratorio.
 - O porque se usa otro sistema físico con propiedades similares a las del prototipo (modelo análogo), y aunque no se parecen físicamente sí se establecen correspondencias entre ellos.
- **Modelos simbólicos.** Es una expresión simbólica en términos lógicos de una situación idealizada, relativamente sencilla que comparte las propiedades estructurales del sistema original. Aunque podrían expresarse de manera no matemática (por ejemplo un diagrama esquemático con los flujos y componentes que intervienen en el ciclo del agua de una cuenca), los modelos de naturaleza matemática son los que presentan mayor interés y los que se han desarrollado a lo largo de la historia del modelado en hidrología. Un modelo matemático expresa el comportamiento del sistema por medio de un conjunto de ecuaciones, que pueden ir acompañadas de declaraciones lógicas expresando las relaciones entre las variables y parámetros.
- **Modelos teóricos, conceptuales y empíricos.** Según el planteamiento matemático del modelo se diferencia entre:
- Modelos teóricos: modelos basados en las leyes de la física. Un modelo teórico tiene una estructura lógica similar al sistema del mundo real y puede ser útil en circunstancias cambiantes.
 - Los modelos empíricos. Se basan en cálculos matemáticos fruto de la experimentación. Por tanto, contienen parámetros que pueden tener poco significado físico directo y pueden estimarse sólo mediante mediciones simultáneas de entrada y salida.
 - Modelos conceptuales. Son modelos intermedios entre los modelos teóricos y los empíricos.

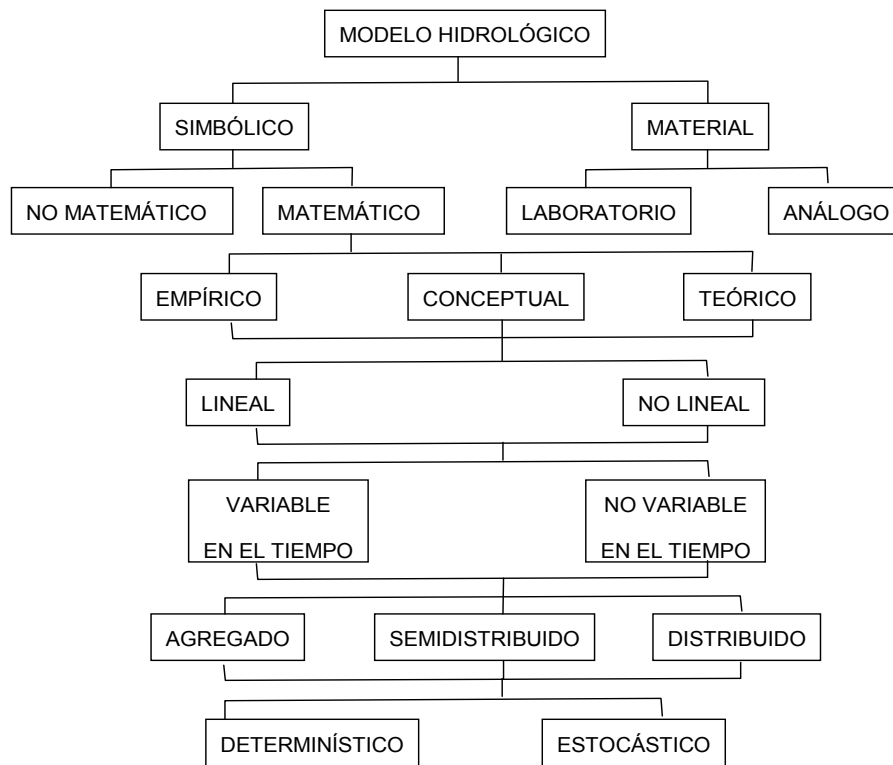


Figura 3. Clasificación de los modelos hidrológicos.
Fuente: Adaptado de Singh (1988), referido en Xu (2002)

➤ **Modelos lineales y modelos no lineales.**

Un modelo se puede organizar en términos de ecuaciones y procesos lineales y procesos no lineales. Un ejemplo típico de un modelo lineal es el Hidrograma Unitario en el que la simplificación de los procesos se realiza por medio de una secuencia lineal entre las entradas, los procesos intermedios y las salidas. Por el contrario, cuando se intenta abordar la mayor complejidad de los procesos físico-hidrológicos se recurre a modelos no lineales.

➤ **Modelos variables en el tiempo y modelos temporalmente no variables.**

Se considera al modelo como no variable en el tiempo cuando su relación entre entradas y salidas no cambia con el tiempo. La forma de la salida depende solamente de la forma de la entrada y no en el momento en el cual se aplica la entrada. Los modelos que no presentan esta propiedad se consideran que son variables en el tiempo. La mayoría de los sistemas hidrológicos son sensibles a las variaciones temporales aunque, para

simplificar, algunos modelos asuman condiciones de no variabilidad temporal.

➤ **Modelos agregados, semidistribuidos y distribuidos.**

Un modelo es agregado cuando, independientemente de los procesos que considere, los parametriza como valores únicos para el conjunto de la cuenca, sin tener en cuenta su diversidad espacial (figura 4 A). Se considera distribuido al modelo que intenta representar con el mayor detalle dichos procesos y parámetros (figura 4 C). El modelo semidistribuido es aquel que da una representación intermedia de la diversidad espacial, utilizando zonas de comportamiento teóricamente similar que se consideran como agregadas (figura 4 B).

➤ **Modelos estocásticos y determinísticos.**

Los determinísticos no consideran aleatoriedad: en la formulación matemática una entrada dada produce siempre una misma salida. Un modelo estocástico tiene salidas que son, por lo menos, parcialmente aleatorias y se usa cuando esta variación es grande.

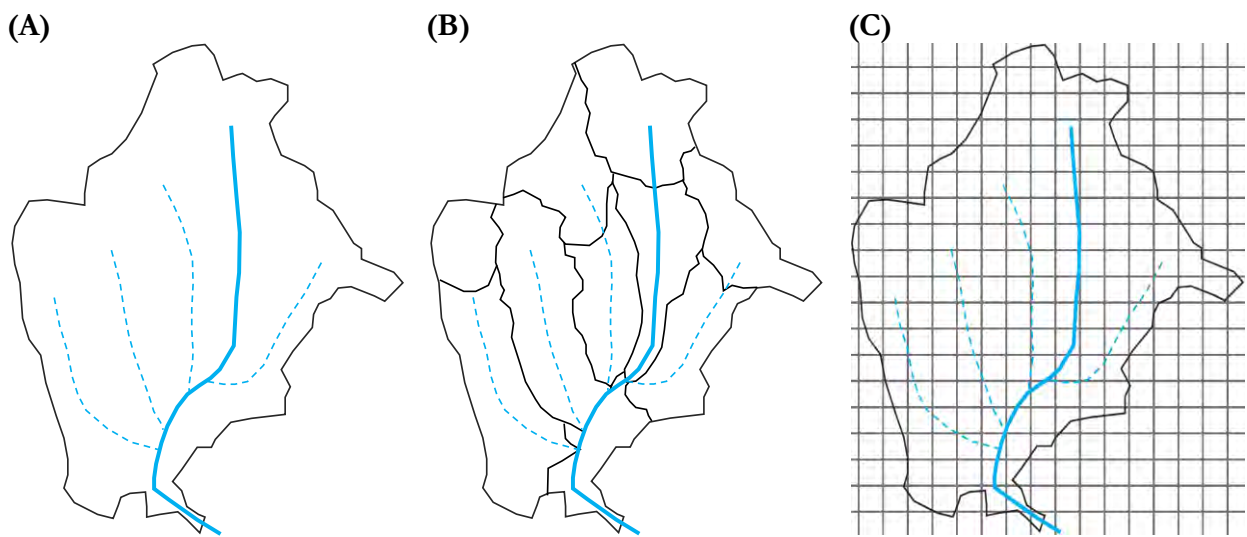


Figura 4. Modelos de tipo agregado (A), semidistribuido (B) y distribuido (C)

2.3. Modelos: desarrollo y procedimiento de aplicación

Se distinguen dos formas de acercamiento a los procesos de modelado. Una de ellas consiste en los procedimientos a seguir si el objetivo es el desarrollo de un modelo hidrológico, o la intervención en la construcción de uno de sus componentes. La otra aproximación se refiere a la forma de trabajar cuando se usa un modelo existente. En ambos casos se debe seguir unos procedimientos (protocolos) que se detallan a continuación.

2.3.1. Proceso de desarrollo de un modelo

El desarrollo de un modelo lleva implícitas una serie de fases que, aunque secuenciales, no son totalmente independientes, pues deben ser comprobadas, y el modelo verificado hasta que finalmente se considere apto para las simulaciones para las que ha sido concebido (figura 5):

- La primera etapa en su construcción es el **modelo perceptual**. La elaboración de un modelo perceptual se basa en la comprensión por parte de las personas que van a trabajar sobre la unidad hidrológica a representar, de manera que puedan ponerse en común la experiencia

del modelador y su interacción con el sistema hidrológico. El modelo perceptual constituye la base del desarrollo de un modelo (o esquema) conceptual subsiguiente.

- **Modelo conceptual**. Una vez resuelta la manera de entender el funcionamiento de los distintos componentes del sistema por medio del modelo perceptual, el conceptual constituye ya la base del desarrollo de un modelo hidrológico final. Por consiguiente, éste ya es una formalización como modelo a través del cual se decide, por medio de formulaciones matemáticas, la definición de los límites del sistema, sus entradas, las variables de estado, las salidas, las conexiones y flujos de los componentes del sistema, etc. Este tipo de modelo (de diseño) no debe confundirse con el modelo conceptual matemático mencionado en el punto 2.2.
- **El modelo procedural**. Una vez elaborado el modelo conceptual, la siguiente fase construye el modelo teniendo en cuenta dos principales acometidos: (1) su traducción matemática para que se formulen las entradas, procesos intermedios y salidas según el

diseño preestablecido por el modelo conceptual y (2) su ensamblaje por medio de código de programación informático para que las ecuaciones puedan resolverse en un modelo de computadora.

- **Calibración del modelo.** El proceso de calibración consiste en la mejora selectiva de los parámetros iniciales del modelo de manera que este aproxime con mayor verosimilitud (sea más realista) los resultados estimados de la simulación. Normalmente la comprobación de la bondad del ajuste del modelo se realiza

por medio de la comparación entre las variables hidrológicas medidas y las obtenidas con el modelo.

- **Validación del modelo.** La fase de validación consiste en la comprobación, una vez calibrado, por medio de simulaciones, de que el modelo funciona correctamente y conforme a los fines para los que ha sido desarrollado. Además de ser funcional, debe valorarse también que pueda ser utilizado sin dificultades tanto por la comprensión de su funcionamiento como por los requerimientos para su parametrización.

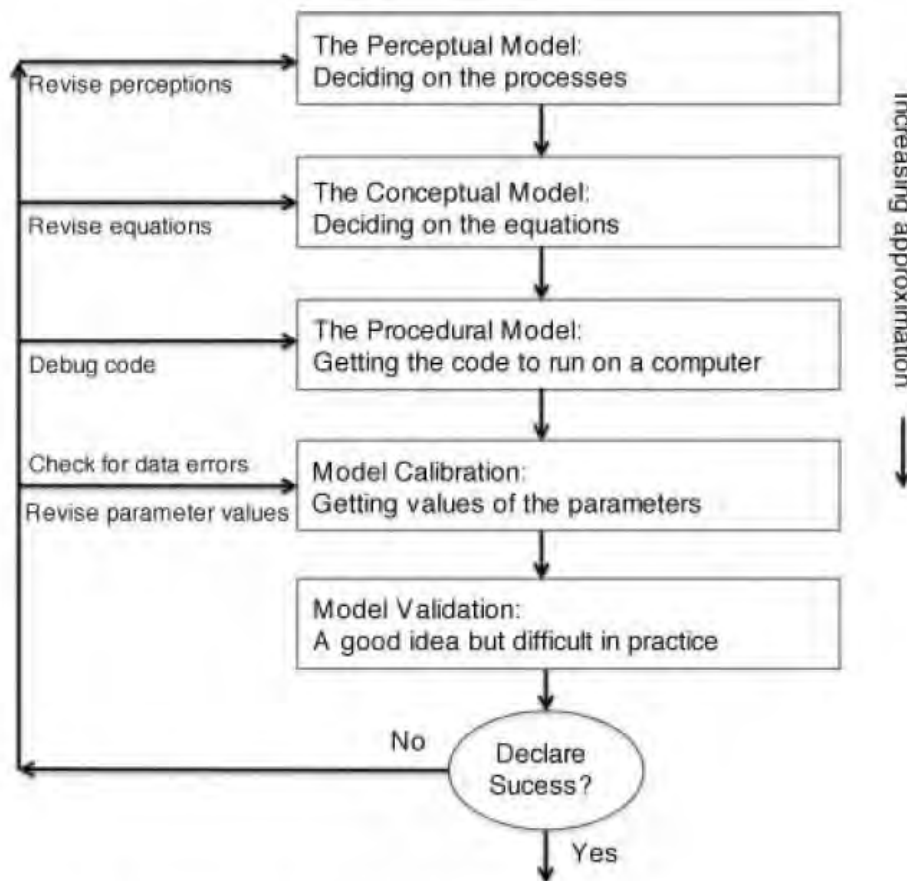


Figura 5. Esquema de los pasos a seguir en el proceso de desarrollo de un modelo.

Fuente: Beven (2012, p. 4)

2.3.2. Su aplicación: protocolo de modelado

El proceso de modelado está sujeto también al seguimiento de una serie de pasos que van desde la misma elección del modelo que se considera idóneo para abordar los análisis hidrológicos hasta la evaluación del mismo como

herramienta útil y que permita sucesivas simulaciones de acuerdo a las valoraciones realizadas en los pasos intermediados existentes entre la selección inicial y evaluación final del modelo. Estas distintas fases constituyen un

protocolo de modelado, las cuales pueden resumirse como:

- **Identificación del modelo.** Es un proceso por el cual, ante la necesidad de un análisis hidrológico dado, se identifica el modelo que se considera más apropiado. En esta primera fase se debe estudiar el funcionamiento del modelo y familiarizarse con su conceptualización y estructura (ver ANEXOS I y II).
- **Introducción de datos al modelo.** Requiere, en primer lugar, de la identificación de los datos que se demanden y su recopilación para seguidamente introducirlos en el modelo de acuerdo a sus propias exigencias y formatos de incorporación, sea mediante una interfaz manual o por medio de un archivo con un formato específico.
- **Calibración.** La calibración consiste en un proceso de ensayo error con el que se ajustan los valores de algunos parámetros para que el hidrograma resultante se asemeje al observado (una serie de datos observados de caudal) de la manera más fiel posible. De esta forma se puede determinar el conjunto de parámetros representados en el modelo que reflejan con mayor exactitud el comportamiento de la cuenca.
- **Validación.** Por medio de la validación de la calibración previamente realizada se consigue certificar la confianza en el modelo. Consiste en realizar sucesivas simulaciones utilizando los parámetros establecidos en la calibración con datos reales (precipitación y caudal, por ejemplo) de períodos distintos a los utilizados en la calibración. Si el análisis entre los resultados estimados por el modelo y los reales son satisfactorios (similares a los obtenidos en la anterior calibración) éste se considera validado y listo para ser usado.
- **Uso generalizado del modelo.** Finalmente el modelo puede ser utilizado

en la cuenca de manera fiable, lo que permite su aplicación ante distintos escenarios de simulación como el pronóstico de caudales para distintos sucesos de precipitación y la evaluación de la incidencia del régimen hídrico de la cuenca ante posibles impactos por modificación de la cubierta vegetal o alteraciones en los suelos.

3. Modelos de flujo (escorrentía)

La aproximación a la descripción de las características de los modelos de flujo, los modelos hidrológicos más convencionales, se ha dividido en tres apartados con los que se cubre (1) los aspectos técnicos y de modelado, (2) la enumeración de ejemplos con trabajos realizados con modelos hidrológicos y (3) la descripción de algunos modelos extensamente divulgados. Los modelos a los que se hará referencia son los de naturaleza semidistribuida y distribuida, los de mayor potencial y desarrollo actual.

3.1. Características de los modelos de flujo

Las características de los modelos se analizan, en primer lugar, teniendo en cuenta la arquitectura o forma de estructurar el proceso de modelado, normalmente por componentes del ciclo hidrológico, y, en segundo, por los enfoques de modelado.

3.1.1. Estructura

La estructura que adquiere un modelo es independiente del detalle de representación, del número de parámetros y de la definición temporal que utilice el modelo hidrológico en cuestión. En la actualidad los de naturaleza distribuida y/o semidistribuida abordan el proceso de modelado construyendo una estructura modular. La conceptualización en componentes prácticamente obliga a que los modelos deban ser construidos utilizando esa arquitectura modular; es decir, dividiendo el modelo en distintos submodelos interconectados entre sí (figura 6).

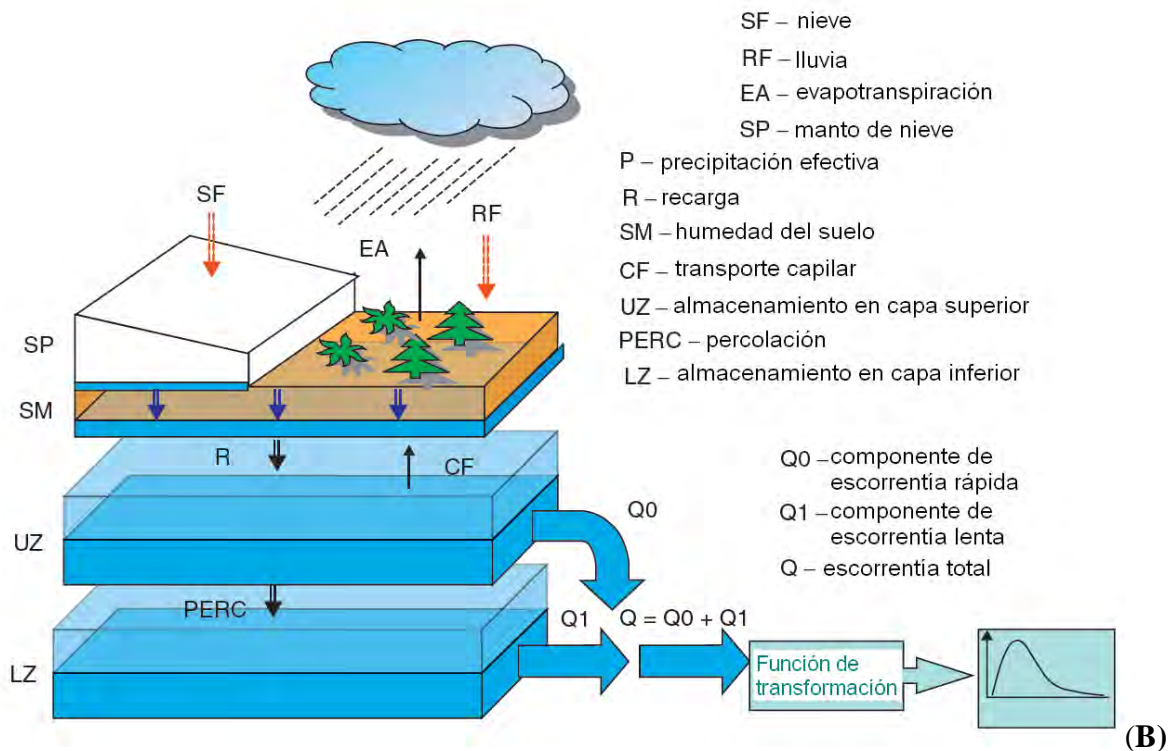
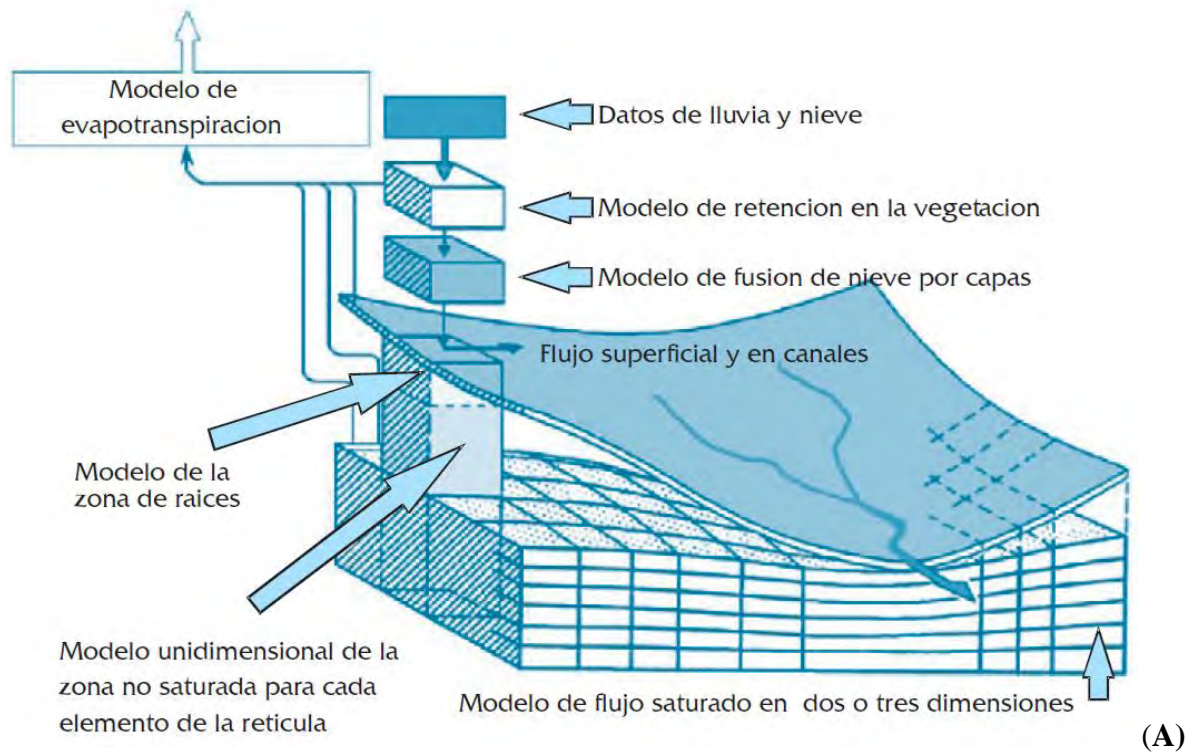


Figura 6. Estructura modular de dos modelos distribuidos distintos: (A) Mike-She; (B): HBV-96.
Fuentes: (A) Vázquez et al. (2004); (B):Solomatine and Wagener (2011, p. 437)

Los modelos más exigentes en su arquitectura, los que ofrecen un alto nivel de detalle y complejidad en sus componentes y módulos, imponen la obtención de un número considerable de parámetros, frente a los más sencillos que se limitan a calcular los principales parámetros. Sin embargo, la mayoría de ellos abordan el modelado siguiendo una división convencional de los procesos y flujos hidrológicos que ocurren en la cuenca. En primer lugar, resuelven la entrada de precipitación (sea con una componente de lluvia únicamente o incorporando también un modelo de nieve), el almacenamiento y pérdidas en la fase aérea del ciclo hidrológico. En segundo lugar atienden a los procesos de generación de escorrentía superficial y transmisión de flujos en la zona del suelo en los distintos planos que éstos pueden dirigirse (vertical, horizontal o permanecer estacionario en el suelo como almacenamiento); finalmente, consideran la dinámica de la circulación del agua en las capas más profundas.

Todos los modelos necesitan la incorporación de la situación inicial de la cuenca, sobre todo cuando se modela un evento. Sin embargo, cuando estamos ante cuencas de drenaje en las que se dispone de escasas mediciones reales y, también, de pocas capacidades para obtenerlas, en ese caso puede ser más conveniente y realista el recurrir a modelos que, aún concibiendo el modelado de manera que separa en los principales componentes expuestos con anterioridad (fase aérea, dinámica de los flujos en los suelos y circulación del agua a capas profundas) los integra y facilita el trabajo.

Ese es el caso de modelos como el HEC-HMS, el cual ha ido evolucionando a partir de modelos históricos más simples. Una de sus principales herramientas a la hora de integrar los distintos componentes es la derivación de los valores iniciales de la cuenca a partir del número de curva (CN: Curve Number) y la posterior obtención del almacenamiento máximo de la cuenca ante circunstancias de humedad antecedente dadas y la precipitación neta.

El número de curva se obtiene por medio de la combinación de tres características intrínsecas de la cuenca como son los usos del suelo-cubierta superficial, la topografía y las

propiedades hídricas del suelo. El proceso de cálculo entre el número de curva y los valores que de él se pueden derivar se basa en una formulación empírica sencilla, habiéndose constituido en un componente de algunos modelos hidrológicos.

3.1.2. Modelado

Se da una gran diversidad de diseño de los modelos hidrológicos que relacionan únicamente la precipitación con la escorrentía, o que relacionan los flujos del agua desde que entran en la cuenca hasta que salen de ella como caudal. Entre los distintos enfoques aplicados del modelado hidrológico están:

- **Modelado de sucesos versus modelado de flujo continuo.** Algunos modelos pueden desarrollarse como modelos continuos: estos se utilizan para simular el flujo y otras funciones de la cuenca (por ejemplo, almacenamiento) durante largos períodos de tiempo. Por el contrario, hay modelos (o módulos de modelos) diseñados para la simulación de sucesos, apropiados para precipitaciones de crecida (eventos de tormenta) o para cuencas con régimen fluvial no constante. Estos modelos se utilizan con frecuencia con fines de diseño (por ejemplo, el diseño de una alcantarilla que admita el paso de un suceso con periodo de recurrencia de 100 años).
- **Tamaño de la cuenca y dimensión temporal del proceso de modelado.** Los procesos a modelar y su representación en el modelo son sensibles a las dimensiones de la cuenca. La respuesta hidrológica integral depende, en primer lugar, de las dimensiones de las células de precipitación y, en segundo de las dimensiones de la superficie sobre la que se dan los procesos intermedios como la dimensión de las masas forestales y los procesos de transmisión de flujos de estas a lo largo de la ladera y a través de la zona no saturada, de manera que, dentro de una cuenca de varios cientos de kilómetros cuadrados, puede producirse escorrentía en una pequeña

cuenca de cabecera pero no aparecer como caudal en la mayor.

Algunos modelos se utilizan para predecir los totales mensuales de escorrentía, mientras que otros están diseñados para analizar las tormentas individuales. Al igual que con la escala espacial, la determinación del intervalo de tiempo que se considera en el modelado es de gran importancia, pues de él dependen los tiempos de recorrido y transmisión de flujos. Los modelos de suceso que analizan un aguacero en cuenca pequeña necesariamente deberán considerar un modelado de paso de tiempo de minutos, mientras que los de flujo continuo, y algunos dedicados a la evaluación de recursos, serán diarios o, incluso, con aproximaciones de balance hídrico mensual.

- **Modelos de flujo urbano.** Frente a los modelos de cuenca, normalmente conceptualizadas con baja o nula presencia de construcciones y, por tanto, ante condiciones de dinámica de flujos en canales naturales, se han desarrollado algunos modelos que contemplan en mayor medida la hidráulica del sistema urbano de manera que puedan establecerse los flujos de entrada a través del sistema de drenaje propios de las ciudades, así como la evacuación de flujos y la posibilidad de inundaciones.
- **Conexión con otros sistemas.** En la actualidad, algunos modelos hidrológicos se diseñan teniendo en cuenta la posibilidad de ser conectados (o asociados) a otros sistemas como su vinculación a modelos atmosféricos. En ese caso, los modelos hidrológicos ofrecen una escala donde coinciden con los modelos climático-atmosféricos. Algunos modelos desarrollan funciones que permiten la incorporación de información espacial utilizando Sistemas de Información Geográfica o la conexión a sistemas de apoyo a la toma de decisiones para gestión hídrica y alarma temprana ante potenciales riesgos de inundación.

3.2. Aplicaciones de los modelos de flujo

En las últimas décadas, el uso y la aplicabilidad de los modelos hidrológicos distribuidos (incluidos también los semidistribuidos) ha ido ampliándose considerablemente. En la práctica, la cantidad de aplicaciones en las que se recurre a los modelos es muy extensa, máxime cuando pueden integrarse con otras técnicas espaciales como la teledetección, otros modelos ambientales y sistemas de gestión territorial. Como ejemplos de aplicaciones se han escogido cuatro grandes áreas de manera que se pueda tener una idea general y amplia desde la perspectiva de la gestión de los recursos hídricos:

- **Desarrollo de modelos.** En la actualidad, los modelos hidrológicos siguen desarrollándose tanto con la creación de nuevos como en la ampliación de los ya existentes. Ello lleva consigo, de acuerdo al esquema general de desarrollo de un modelo de la figura 5, el planteamiento de su construcción (Bertens et al., 2000), y también la valoración de sus componentes en las fases de calibración y validación (Weber et al., 2010) y en el análisis de sensibilidad de parámetros (Vázquez et al., 2004).
- **Aplicación en la evaluación de impactos ambientales.** La amplitud de los trabajos que consideran la incidencia de los impactos en el régimen hídrico de cuenca producidos por modificaciones ambientales es grande. Destacan tres áreas de aplicación: (1) las consecuencias de los incendios forestales en la evaluación de los volúmenes de escorrentía producidos y en la representación del hidrograma de cuenca (Seibert et al. 2010); (2) el reflejo de la dinámica de las alteraciones de las cubiertas vegetales en la hidrología de cuenca (Wagesho, 2014), y (3) la inundabilidad de zonas urbanas por el riesgo y consiguiente daño que las avenidas pueden producir en personas y bienes (Pina et al., 2014).
- **Gestión de cuencas.** Lógicamente, el desarrollo y puesta a punto de modelos hidrológicos para evaluar y hacer un

seguimiento de las cuencas hidrográficas es una de las áreas de aplicación fundamentales de los modelos hidrológicos, en general, y de los distribuidos, en particular. Los aspectos de su aplicación y uso son muy variados y va desde la puesta a punto de un modelo determinado para poder evaluar el régimen de cuenca (Re et al. 2008) hasta análisis específicos para la cuantificación de las aguas superficiales como recurso hidrológico (Kiptala et al. 2014).

- **Cambio climático.** Una de las áreas de aplicación de muchos estudios ambientales es precisamente la relación con el cambio climático, con los posibles impactos y la adaptación a las condiciones futuras que significarán las modificaciones en los sistemas naturales impuestas por la continuidad de estos impactos. La aplicación de los modelos hidrológicos al estudio del impacto ambiental tiene también una fuerte implantación. Como ejemplos cabe destacar el estudio individualizado de la incidencia del cambio climático en la frecuencia de las inundaciones en cuencas de drenaje (Camici et al. 2014) y la combinación de las consecuencias del cambio climático con el impacto de las modificaciones de los usos del suelo en cuencas de gran tamaño (López-Moreno et al. 2011).

3.3. Descripción de algunos modelos de flujo

Existe una gran cantidad de modelos hidrológicos (ver la tabla del ANEXO I con la síntesis de modelos realizada por Kampf y Burges (2007)). Los más extendidos y generalistas abordan una amplia gama de escenarios de simulación, pudiendo ir desde cuencas pequeñas y sucesos individualizados hasta grandes áreas de drenajes y flujo continuo; desde la estimación de la escorrentía superficial hasta la combinación de ésta con transporte de partículas y su interconexión con las aguas subterráneas. A medida que la investigación en modelos hidrológicos avanza, que los modelos más consolidados amplían sus funcionalidades y que la demanda de modelos (incluyendo los comerciales) más generalistas –que aporten

mayores potenciales de modelado bien directamente en el modelo o bien por su conexión con nuevos módulos- la separación de funciones y la clasificación de los modelos en el tipo de flujo que modela y si son únicamente de flujo o de transporte se hace más compleja. Sin embargo, en este apartado y en el correspondiente relativo a los modelos hidrológicos de transporte se ha considerado conveniente separarlos de manera que se puedan comprender sus principales características y potenciales de uso. En ambos casos se tratará con modelos hidrológicos de cuenca de drenaje. Con respecto a la descripción de algunos modelos de flujo, se han seleccionado tres por su distinta naturaleza, accesibilidad al usuario general y por su estructura y complejidad de uso. Estos son los modelos MIKE-SHE, HEC-HMS y TETIS.

3.3.1. MIKE SHE

Desarrollador/Institución: El actual modelo está desarrollado por el instituto danés de hidráulica (Danish Hydraulic Institute -DHI).

Página WEB del modelo: <http://www.mikebydhi.com/products/mike-she>

Tipo de modelo: Es un modelo de naturaleza física que incorpora una gran cantidad de parámetros. Realiza una representación espacial de tipo distribuido basada en una malla regular con estructura de datos ráster y tamaño de celda (pixel) cuadrada (figura 6A).

El modelo, actualmente comercializado por el DHI, no es de libre acceso, por lo que hay que pagar una cantidad considerable por su licencia.

Descripción: MIKE SHE es un modelo que ha evolucionado a partir de su antecesor el “System Hydrologique European” (SHE), inicialmente desarrollado como proyecto conjunto entre tres organizaciones de Francia, Reino Unido y Dinamarca.

Simula los flujos del agua en la totalidad de la fase terrestre del ciclo hidrológico. A pesar de su complejidad, tiene una estructura de modelado flexible que incluye un amplio rango de métodos numéricos para cada proceso. Tanto los procesos hidrológicos que se simulan como los métodos numéricos que se utilizan pueden combinarse según los requerimientos de aplicación y la disponibilidad de datos.

Permite la incorporación directa de información producida en distintos formatos y plataformas de Sistemas de Información Geográfica.

En la estructura del modelo se distinguen cinco componentes principales, cada uno de ellos se ajusta a un conjunto de procesos y parámetros del ciclo hidrológico:

➤ **Precipitación y evapotranspiración.**

Se consideran los elementos de mayores dimensiones en el ajuste del balance hídrico que realiza. El cálculo de la evapotranspiración actual está basado en el consumo de la vegetación, para lo que también se utilizan parámetros de interceptación, de suelos, de agua almacenada en superficie, de la zona de raíces y las transmisiones hídricas como agua supsuperficial.

➤ **Precipitación de nieve.** El modulo permite trabajar con almacenamientos de nieve. Una vez establecido el almacenamiento y el tipo de nieve (seca o húmeda), el modelo posee una serie de algoritmos para convertirla en escorrentía superficial, los cuales incluyen correcciones de temperatura según la altitud, de radicación solar y de precipitación sobre nieve.

➤ **Escorrentía superficial.** El cálculo de la escorrentía superficial se realiza por medio de una doble alternativa: (1) un método simple de estimación basado en criterios de semidistribución de la escorrentía superficial y (2) un método de diferencias finitas para la estimación detallada de la precipitación y el escurrimiento.

➤ **Flujo concentrado.** El caudal se simula por medio de cálculos hidrodinámicos que incluyen también operaciones sobre estructuras hidráulicas tales como compuertas, bombeos y presas. El módulo también posee un conjunto de algoritmos de circulación del flujo menos exigentes en información que son apropiados para su aplicación a grandes redes.

➤ **Zona no saturada.** El módulo realiza los cálculos relacionados con el flujo vertical no saturado. Para ello incluye un modelo de capas de la zona de raíces con el que se estima el balance hídrico en la zona no saturada. Para la infiltración en suelos secos utiliza el modelo de Green y Ampt.

3.3.2. HEC-HMS

Desarrollador/Institución: Centro de Ingeniería Hidrológica (Hydrologic Engineering Center-HEC) del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de Estados Unidos (U.S. Army Corps of Engineers-USACE).

Página WEB del modelo: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/>

Tipo de modelo: Es un modelo conceptual (de base física y empírica), con representación espacial semidistribuida por medio de la división de la cuenca en unidades menores de subcuencas.

La licencia del modelo es de dominio público (de libre acceso), por lo que su descarga, así como una cantidad considerable de información, incluyendo los manuales de usuario de las distintas versiones, se puede realizar directamente desde su página WEB.

Descripción: El modelo HEC-HMS ha seguido una larga tradición en su desarrollo, pues es la evolución directa del conocido y ampliamente utilizado HEC-1. El programa está diseñado para simular los procesos de conversión de la precipitación en escorrentía en cuencas dendríticas, tanto en condiciones naturales como intervenidas.

Las nuevas versiones HEC-HMS presentan mejoras con respecto al antiguo HEC-1, incluyendo una mayor operatividad en el proceso de modelado distribuido, la simulación continua (no sólo de suceso) y, la interfaz gráfica de usuario que facilita las labores de entrada de datos antes del inicio del proceso de modelado y la gestión de la información generada después del modelado.

Se ha desarrollado una aplicación (HEC-GeoHMS) que facilita la incorporación de información espacial al modelo HEC-HMS. HEC-GeoHMS es una utilidad desarrollada para el Sistema de Información Geográfica ArcGIS y

principalmente está pensado para el desarrollo de los submodelos de cuenca de HEC-HMS.

El programa trabaja con cuatro módulos básicos que definen en su conjunto la entrada de datos y la estructura de simulación de la cuenca:

- **Datos de entrada.** El programa presenta un sistema de entrada de datos. Datos que serán posteriormente tratados de acuerdo a los distintos submódulos de modelado para los que se requieren.
- **Modelo de cuenca.** El modelo de cuenca es utilizado para representar la parte física de la cuenca. El usuario desarrolla un modelo de cuenca agregando y conectando elementos hidrológicos. Los elementos hidrológicos usan modelos matemáticos para describir los procesos físicos en la cuenca.
- **Modelo de precipitación.** Calcula la precipitación requerida en una subcuenca. Se puede utilizar información puntual de precipitación o distribuida espacialmente. El módulo puede modelar precipitación sólida y líquida y, también, evapotranspiración. El cálculo de la evapotranspiración sólo es requerido cuando se modelan respuestas hidrológicas en largos períodos de tiempo.
- **Módulo de control.** Las especificaciones de control fijan el tiempo de duración de cada ejecución de una simulación. Las especificaciones de control deben incluir la fecha de inicio, la fecha de finalización y el intervalo de tiempo (minutos, horas, días) de la simulación.

3.3.3. TETIS

Desarrollador/Institución: Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental (GIMHA) del Área de Investigación de Hidráulica e Hidrología del Instituto de Ingeniería del Agua y el Medio Ambiente (IIAMA), de la Universidad Politécnica de Valencia (España).

Página WEB del modelo:

<http://lluvia.dihma.upv.es/ES/software/software.html>

Tipo de modelo: Es un modelo conceptual (de base física y empírica), con representación espacial distribuida basada en una estructura raster de malla regular cuadrada.

La licencia del modelo es de dominio público. Su descarga se hace directamente desde la página WEB en la que está alojado el modelo, previo la cumplimentación de un formulario de usuario.

Descripción: TETIS es un modelo global, es decir, con un mismo modelo se pueden resolver problemas tanto de crecidas y erosión (discretización temporal de minutos y horas) como de Recursos Hídricos (discretización temporal diaria). Además, tiene un potente algoritmo de calibración automática de sus parámetros efectivos y de los valores iniciales de todas las variables de estado, que facilita su implementación práctica. Desarrollado inicialmente para cuencas de montaña, el modelo está ya adaptado para ser aplicado también a cuencas grandes con diversidad de usos del suelo y topografías contrastadas.

El modelo se basa en una entrada de datos inicial que facilita su posterior ejecución y simulación de hidrogramas. Pero no posee ninguna facilidad para incorporar directamente datos espaciales creados con Sistemas de Información Geográfica, ni conexiones a ellos que facilite la entrada de información espacial. Sin embargo, estos documentos iniciales están contruidos en formato ASCII (de texto) con una estructura similar a los formatos de exportación de ArcGIS, por lo que es posible producirlos en ese o cualquier otro Sistema de Información Geográfica y posteriormente adaptarlos a los requerimientos de TETIS.

Para cada celda de la cuenca, el modelo efectúa un balance de agua siguiendo una conceptualización de tipo tanques (figura 7). La simulación de la producción de escorrentía para cada celda se basa en describir las interacciones atmósfera – vegetación – suelo – acuífero a través de cinco tanques interconectados entre sí. Los flujos de agua entre cada tanque representan los procesos más significativos en el ciclo hidrológico: precipitación (lluvia o nieve), evapotranspiración, infiltración, percolación y

pérdidas subterráneas. Las salidas posibles de agua para cada celda se da por los tres componentes principales de la escorrentía: la escorrentía directa (producida por escorrentía hortoniana y escorrentía por saturación), el flujo subsuperficial y el flujo base. Cada proceso involucrado se simula con ecuaciones simples y

con pocos parámetros para estimar. La formulación hidráulica utilizada en el modelo TETIS se basa en una aproximación de la onda cinemática, asumiendo un lecho fijo en cada celda en el cual se aplica una ecuación de balance.

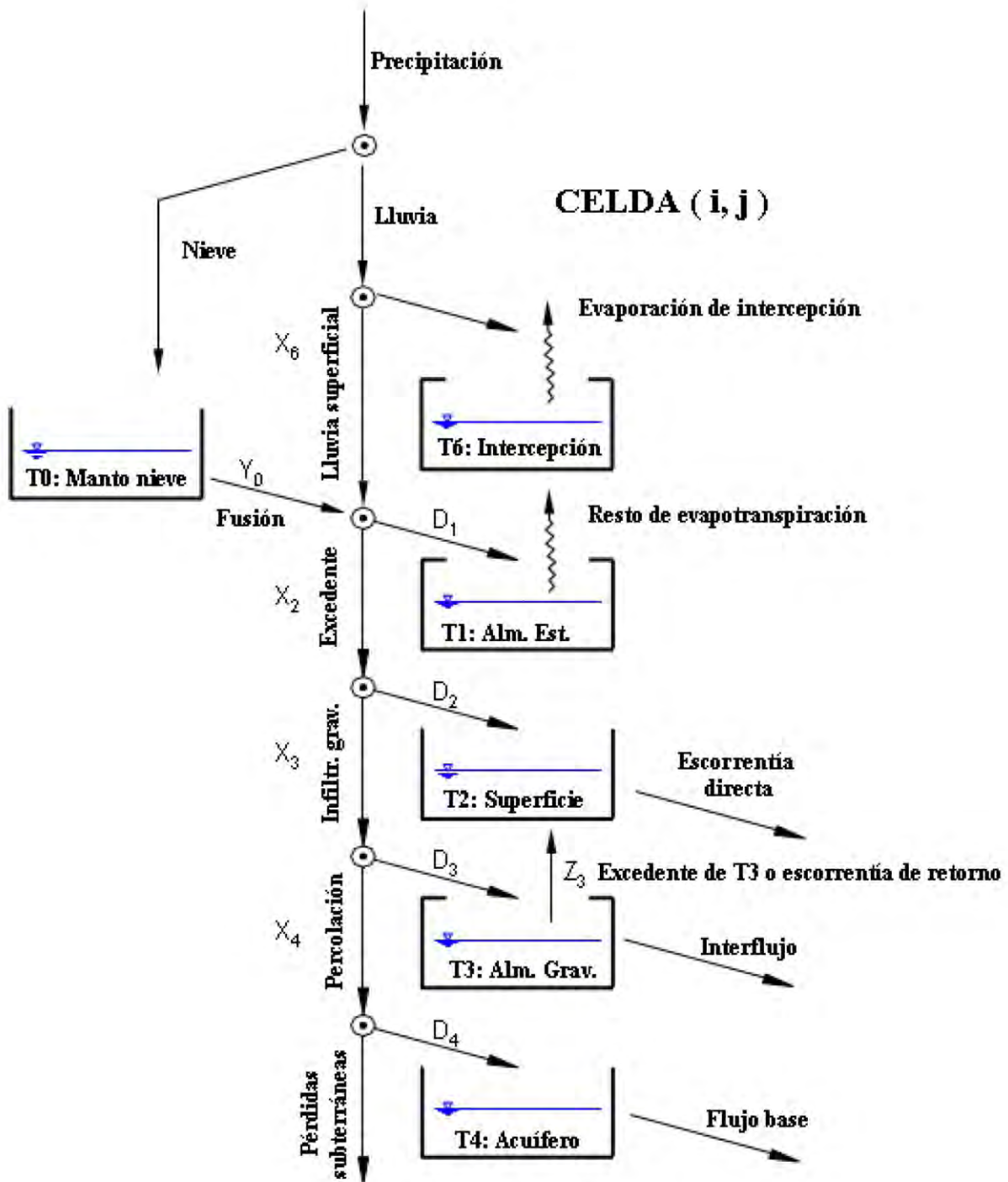


Figura7. Esquema conceptual de tanques a nivel de celda del modelo TETIS

Fuente: Francés García et al. (2014)

4. Modelos de transporte

En paralelo con el progreso de los modelos hidrológicos distribuidos y semidistribuidos se ha ido desarrollando también una serie de modelos hidrológicos cuyo objetivo es la estimación de las cargas de sustancias que pueden ser arrastradas por los flujos. A estos modelos se les da el nombre general de modelos de transporte, existiendo una gran variedad de ellos. Este apartado sobre modelos de transporte se centrará en los modelos hidrológicos de cuenca y exclusivamente en aquellos que, aunque también puedan simular el flujo, tienen la habilidad de estimar las concentraciones de otras sustancias como contaminantes de origen agrícola y sedimentos. Al igual que para los modelos de flujo, esta parte se ha dividido en tres apartados en los que se exponen (1) los aspectos técnicos y de modelado, (2) el comentario de ejemplos con trabajos realizados con modelos hidrológicos de transporte y (3) la descripción de algunos de ellos.

4.1. Características de los modelos de transporte

Las características de los modelos de transporte se analizan en este apartado desde una doble perspectiva: (1) según su estructura para analizar el transporte de sustancias teniendo en cuenta el proceso de conversión de precipitación en escorrentía y (2) por los enfoques de modelado a los que dan lugar este tipo de aplicaciones.

4.1.1. Estructura

Los modelos de transporte que simulan a escala de cuenca de drenaje descansan en gran medida en la representación inicial de los procesos involucrados en la fase terrestre del ciclo hidrológico, teniendo en cuenta la conceptualización de los distintos componentes y flujos que intervienen en la conversión de la precipitación inicial en escorrentía concentrada en cauce.

En consecuencia, la estructura de un modelo de transporte ha de tener al menos dos grandes módulos de simulación (figura 8). Uno de ellos se corresponde con la generación del hidrograma, sea de suceso o de flujo continuo, y

el otro con el respectivo modelado del soluto y/o material transportado por el agua de acuerdo a su capacidad de arrastre ante las características específicas de la cuenca y las circunstancias individuales de la precipitación (si se trata de una simulación de evento) o del flujo permanente (si se trata de una simulación de flujo continuo).

Inicialmente se resuelven los componentes en los que se ha conceptualizado el modelo; por ejemplo dinámica del agua en el suelo y en la zona no saturada, flujos de escorrentía superficial, flujo vertical del agua hacia capas profundas por debajo de la zona no saturada, escorrentías subsuperficiales entendidas como flujos laterales, aportes de flujo base, etc., de manera que se simula un hidrograma de salida con unas características determinadas debido a las distintas fases y tipos de aportes que contribuyen a su forma.

Asociados a los procesos anteriores se determinan las tasas de transporte de los materiales modelados; en la figura 8 se muestran dos tipos muy distintos de materiales como son sedimentos procedentes del arrastre de partículas del suelo de distinto tamaño y los contaminantes, entendidos estos en gran medida como de origen difuso y agrícola.

Los módulos de simulación de los materiales transportados por el agua necesariamente han de ser distintos dependiendo del tipo de carga que se simula pues, al menos, debe distinguirse entre material arrastrado por la fuerza del flujo en la fase del ciclo hidrológico que se simula (transporte de sedimentos) y contaminante disuelto en el agua con un potencial de biodegradación (transporte de contaminantes). Es por ello que los modelos de transporte que atienden a más de un tipo de sustancias (ver figura 8) se estructuran de manera que sean módulos de simulación separados.

En el proceso de simulación, los modelos requieren de la incorporación de datos reales, observados. En primer lugar, para la valoración de los hidrogramas simulados con respecto a los verdaderos y, en segundo, y de manera idéntica a la comparación del hidrograma medido con el simulado, para el cotejo de las simulaciones de materiales transportados con respecto a los valores reales medidos.

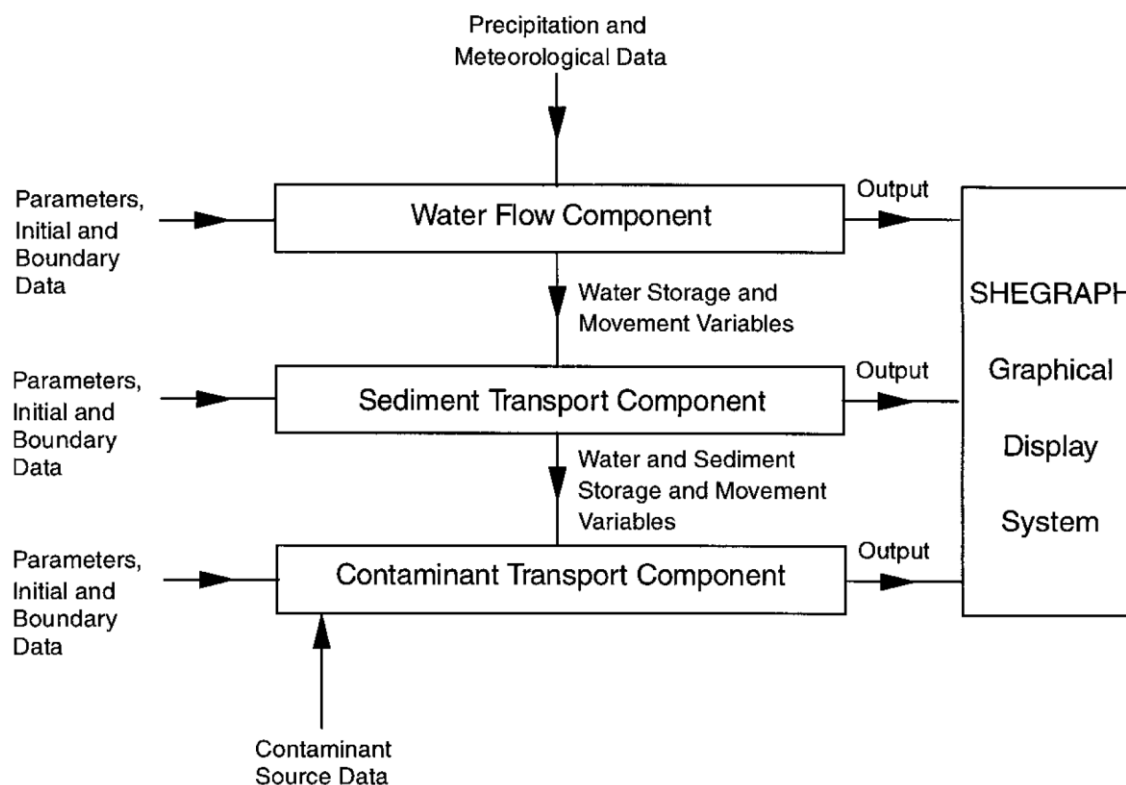


Figura 8. Ejemplo de estructura de modelado de un modelo hidrológico de transporte (Modelo SHETRAN).
Fuente: Ewen et al. (2000)

4.1.2. Modelado

Los modelos de transporte se sustentan en una doble estructura que combina las características de los modelos hidrológicos de flujo y las propias del traslado de las materias transportadas. Con respecto al modelado de flujo, los modelos de transporte adoptan las distintas estrategias de modelado comentadas en el punto 3.1.2.: modelado de sucesos y de flujo continuo, estructuración del modelo teniendo en cuenta el tamaño de la cuenca y la dimensión temporal del proceso de modelado, desarrollos para el modelado del ciclo del agua en zonas urbanas y la adaptación y conexión con otros sistemas de modelado.

Si se atiende a los procesos referidos al transporte de sustancias que realizan los modelos hidrológicos de transporte, en ese caso hay que distinguir entre los varios tipos de carga que se modela, pudiéndose diferenciar entre dos grandes grupos: (1) el transporte y arrastre de sedimentos o materiales procedentes de la parte superficial del suelo y (2) el transporte de sustancias que van disueltas en el agua, por ejemplo los contaminantes:

- **Transporte de sedimentos.** El modelado del transporte de sedimentos exige que se contemple una serie de circunstancias propias de los diferentes tamaños que pueden tener los sedimentos pues, dependiendo de su calibre, éstos serán más susceptibles a ser, en primer lugar, arrancados y, después, trasladados en suspensión o arrastrados por la fuerza de los flujos. Los algoritmos de los modelos tienen en cuenta el proceso inicial de arranque del material (comúnmente considerado como un proceso de erosión “in situ”) y los de transporte a lo largo de las laderas debido a flujos superficiales y también a flujos laterales subsuperficiales. Finalmente, los modelos estiman su acumulación y transporte en volumen de sedimentos por el flujo concentrado.
- **Transporte de sustancias disueltas en el agua.** Consideradas las sustancias disueltas en el agua como potenciales contaminantes, los modelos se desarrollan bajo una conceptualización

de su procedencia, principalmente relacionada con la distribución espacial de los usos y cubiertas del suelo y las prácticas de manejo y gestión que llevan asociadas. La formulación tiene en cuenta, además, el tipo de material que se transporta (fertilizantes, pesticidas, etc.), de manera que se considera su propio ciclo de pervivencia, posible degradación y potencial transformación. Una vez establecidos los orígenes y cargas del material a transportar, los modelos establecen los cálculos de su transporte a lo largo de la cuenca y su acumulación final en el flujo concentrado.

4.2. Aplicaciones de los modelos de transporte

Las características de las aplicaciones con modelos de transporte se exponen de acuerdo al desarrollo de modelos, la gestión de cuencas y los impactos que pueden ocurrir en una cuenca de drenaje, incluido el cambio climático:

- **Desarrollo de modelos.** Al ser una de las áreas de la modelización hidrológica de más reciente desarrollo, la creación de modelos es relativamente frecuente. Sin embargo, en muchos casos se sigue la tradición de tomar modelos de cuenca ya existentes a los que se les modifica y amplía con nuevos módulos para que simulen el transporte. De esa manera, y aprovechando los modelos distribuidos (y semidistribuidos), se han desarrollado modelos generalistas de transporte de sedimentos y solutos (Ewen et al., 2000), y también modelos para circunstancias específicas de cultivo y contaminantes como el construido para simulación de pesticidas utilizados en el cultivo del arroz (Boulangé et al., 2014).
- **Adaptación para el análisis y gestión de cuencas.** La necesidad de conocer las tasas de erosión, la producción de sedimentos y la movilización de las cantidades de contaminantes a través de las cuencas de drenaje para una mejor gestión de los recursos y la cumplimentación de la legislación

medioambiental hace que se recurra a la adaptación de modelos de transporte. El proceso de adaptación de un modelo para la evaluación y seguimiento del transporte de sustancias necesariamente requiere que éste se calibre y valide (Hahn et al., 2013). Una vez aceptado como un instrumento efectivo, el modelo puede ser utilizado en la gestión de cuencas de distintos tamaños, no sólo pequeñas como el ejemplo anterior (Hahn et al., 2013), sino mucho más grandes (Domínguez et al., 2006; Gaisera et al., 2008).

- **Impactos y cambios ambientales.** La evaluación de los impactos y cambios ambientales son áreas de estudio y aplicación inherentes a la naturaleza de los modelos de transporte. Tres son las áreas más destacadas de su aplicación: (1) los incendios forestales por el potencial que presenta para aumentar las tasas de erosión y transporte de sedimentos y contaminantes (Rosso et al., 2007); (2) las alteraciones impuestas por los cambios de usos del suelo y la gestión de las cubiertas superficiales asociadas (Cai et al., 2011) y (3) las modificaciones impuestas por el cambio climático (Donner et al., 2002; Ma et al., 2014).

4.3. Descripción de algunos modelos de transporte

De entre los distintos modelos de transporte que existen se describen a continuación tres (los modelos SWAT, AnnAGNPS y WEPP). Se utilizan como ejemplos de esa variedad, pues abordan de distinta manera el modelado de cuenca: SWAT es un modelo continuo a escala temporal diaria que simula un amplio espectro de materiales susceptibles de ser transportados; AnnAGNPS modela también un buen número de sustancias que pueden ser transportadas pero es consecuencia de la integración de partes de otros modelos, y WEPP es un modelo para la estimación de la erosión en laderas y pequeñas cuencas agrícolas. Para más información sobre otros modelos se recomienda la lectura del trabajo de Borah y Bera (2003) que incluye la

revisión de once modelos de transporte, cuyas características se incluyen en el ANEXO II.

4.3.1. SWAT

Desarrollador/Institución: El modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) ha sido desarrollado por el “Grassland, Soil and Water Research Laboratory” en Temple (Texas), perteneciente al Servicio de Investigación sobre Agricultura (Agricultural Research Service-ARS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (United States Department of Agriculture-USDA).

Página WEB del modelo: <http://swat.tamu.edu/>.

Tipo de modelo: Es un modelo conceptual de cuenca de naturaleza espacial semidistribuida, desarrollado para evaluar el impacto del manejo y prácticas realizadas en suelos en cuencas complejas (con diversidad de cubiertas superficiales) y grandes.

La licencia del modelo es de dominio público (de libre acceso), por lo que se puede descargar directamente desde su página WEB.

Descripción: El modelo es capaz de simular en cuencas agrícolas el transporte de sedimentos, nutrientes, pesticidas y bacterias, además de la escorrentía superficial. SWAT divide la cuenca sobre la que realiza el modelado en subcuencas, creando dentro de ellas distintas Unidades de Respuesta Hidrológica de acuerdo a la información específica que se le provee sobre cubiertas superficiales/usos del suelo, suelos y topografía. Las simulaciones que realiza el modelo para cada Unidad de Respuesta Hidrológica son posteriormente integradas (generalizadas) en cada subcuenca.

El módulo hidrológico de SWAT estima por separado la escorrentía que se produce en cada subcuenca. Para ello la escorrentía superficial se calcula por medio de un modelo de balance hídrico del suelo basado en datos diarios de precipitación. La escorrentía estimada en cada subcuenca es posteriormente conducida e integrada para calcular la escorrentía total que se produce en la cuenca.

Con respecto al transporte de contaminantes, el modelo estima, en primer lugar, su acceso a los distintos tramos del sistema de drenaje, para después transportarlos hasta la salida de la cuenca o punto de salida sobre el

cual se construye el espacio geográfico que se modela.

Para el cálculo de la erosión, el modelo tiene implementado un módulo basado en la ecuación universal de pérdida del suelo modificada (Modified Universal Soil Loss Equation-MUSLE), que considera distintos aspectos relevantes para la producción de erosión y sedimentos como la agresividad de la lluvia, el tipo de cultivo y sus prácticas de manejo y la susceptibilidad del suelo a ser erosionado.

Permite la incorporación de información espacial por medio de una extensión (ArcSWAT) creada para el Sistema de Información Geográfica ArcGIS.

4.3.2. AnnAGNPS

Desarrollador/Institución: El modelo AnnAGNPS ha sido desarrollado por el servicio de conservación de los recursos naturales (Natural Resources Conservation Service-NRCS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (United States Department of Agriculture-USDA).

Página WEB del modelo: <http://www.nrcs.usda.gov/wps/portal/nrcs/detail/full/?cid=stelpdrdb1042468>.

Tipo de modelo: Es un modelo de base física, espacialmente distribuido, con la división de la cuenca en malla de celdas regulares cuadradas. Modela el transporte de distintos materiales de manera continua a escala temporal diaria.

La licencia del modelo es de dominio público (de libre acceso). Es fácilmente accesible desde su página WEB.

Descripción: AnnAGNPS es una versión mejorada del modelo de suceso ya existente AGNPS (Agricultural Non-Point Source Model). El Nuevo AnnAGNPS guarda muchas de las características de modelado de su predecesor, pero incluye nuevos algoritmos para la estimación de flujos laterales subsuperficiales. El modelo divide la cuenca en pequeñas áreas de drenaje con valores ambientales homogéneos de usos del suelo, suelos, y otros factores que intervienen en el proceso hidrológico y de transporte de sustancias. Estas sub-áreas se integran para simular la escorrentía superficial y la carga de contaminantes a lo largo de la red de drenaje de manera que se pueda evaluar la contaminación difusa de la cuenca.

Para la simulación de la erosión y otros procesos, AnnAGNPS incorpora componentes de varios modelos como el modelo RUSLE (Revised Universal Soil Loss Equation-RUSLE), el modelo CREAMS (Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems), el modelo GLEAMS (Groundwater Loading Effects on Agricultural Management Systems) y el modelo EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator).

AnnAGNPS hace una división de la cuenca que se modela en subcuencas utilizando la integración de celdas que se consideran como pertenecientes a una misma Unidad de Respuesta Hidrológica. Calcula el contenido de humedad del suelo por medio del método del número de curva.

Para facilitar la incorporación espacial se ha creado un programa (TOPAZ) que permite la comunicación de AnnAGNPS con Sistemas de Información Geográfica.

4.3.3. WEPP

Desarrollador/Institución: El modelo ha sido desarrollado por el Servicio de Investigaciones sobre Agricultura (Agriculture Research Service-ARS) del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (United States Department of Agriculture-USDA)

Página WEB del modelo:
<http://www.ars.usda.gov/News/docs.htm?docid=10621>.

Tipo de modelo: WEPP (Water Erosion Prediction Project) es un modelo conceptual distribuido basado en procesos que se simulan tanto de manera continua como con sucesos.

La licencia del modelo es de dominio público (de libre acceso), pudiéndose acceder al mismo desde su página WEB.

Descripción: El modelo simula escorrentía superficial y producción de sedimentos en laderas y en pequeñas cuencas de drenaje. Permite la simulación de escenarios debidos a los efectos de los cultivos, su rotación y características del terreno cultivado.

WEPP tiene una estructura modular entre cuyos componentes están los que tratan los datos meteorológicos (incluida la acumulación de nieve y su fusión), la irrigación, los procesos de escorrentía superficial, el balance hídrico, el

crecimiento de las plantas, la gestión de residuos, la alteración del suelo por labranza y los procesos de erosión.

El modelo, para predecir la erosión considera los procesos erosivos tanto de la escorrentía laminar como la concentrada en regueros. Incorpora componentes de otros existentes como una modificación del balance hídrico y percolación del modelo SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) y de estimación de la erosión del modelo EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator).

Existe una extensión para ArcGIS (GeoWEPP) que facilita el trabajo con modelos digitales de elevación para la extracción de información topográfica y su incorporación como datos de entrada al modelo.

5. Algunos comentarios finales

Desde los primeros modelos desarrollados en la primera mitad del siglo XX, basados en formulaciones empíricas y de naturaleza agregada para toda la cuenca, los modelos hidrológicos han ido progresando en su desarrollo y ampliando sus aplicaciones. Sin embargo, hay que tener en cuenta que a lo largo de su historia los modelos han mantenido unas características definitorias que han permitido distinguir un tipo de otro.

Se diferencian por su aproximación matemática (empírica, conceptual y física), por la formulación simplificada de los procesos de manera consecutiva (lineal) o por si se consideran inter-relaciones entre ellos que lo alejan de la linealidad secuencial, por si son fijos (no variables) o por si tienen en cuenta la variabilidad temporal del conjunto de procesos, por si consideran la cuenca como un ente unitario (modelos agregados) o tienen en cuenta la variabilidad espacial de los parámetros (semidistribuidos y distribuidos) y por el enfoque matemático fijo (determinístico) o tienen en cuenta la aleatoriedad o incertidumbre de los procesos y los resultados (estocástico).

Tanto en el desarrollo de los modelos como en su aplicación deben seguirse una serie de pasos o fases. Si se trata de su construcción, la secuencia va desde la primera fase de determinación del modelo perceptual, seguida por el diseño de un modelo conceptual y la construcción del modelo procedural, hasta las últimas de calibración y validación, de manera

que éste se considere apropiado para su uso generalizado. En cuanto al uso de los modelos, se debe establecer un protocolo el cual consiste en la identificación del modelo más apropiado a las necesidades para las que se requiere, la introducción de datos, y su calibración y validación en la cuenca en la que se va a aplicar de manera que permita su uso generalizado.

Cada vez es más frecuente el que los modelos realicen otro tipo de simulaciones más allá de la mera conversión de la precipitación en flujo concentrado (caudal), por lo que cabe distinguir entre modelos de flujo exclusivamente y entre modelos que, además del flujo, estiman el transporte de sustancias, como sedimentos y contaminantes de origen agrícola.

Los modelos de flujo de naturaleza distribuida se caracterizan por ser modelos complejos que abordan la simulación de los distintos componentes del ciclo hidrológico terrestre teniendo en cuenta la variedad de representación de los parámetros, flujos y filtros existentes en una cuenca de drenaje: son modelos espacialmente distribuidos (o semidistribuidos) con estructuras en varios módulos (precipitación- evapotranspiración, dinámica del agua en el suelo y zona no saturada, transmisión de flujos a capas profundas y lateralmente en la zona no saturada, etc.). Tienen una amplia variedad de aplicaciones que alcanzan desde la evaluación de los recursos hídricos de cuenca, hasta la valoración de impactos (incendios forestales, cambios de cubiertas superficiales) y análisis de escenarios de cambio climáticos. Ejemplos de dichos modelos son MIKE-SHE (bajo licencia comercial), HEC-HMS y TETIS (bajo licencia abierta de dominio público).

Los modelos de transporte a escala de cuenca se caracterizan por, además de incorporar una módulo de simulación de escorrentía, tener otros adicionales que evalúan y estiman cargas de materiales transportados por arrastre-suspensión o dilución. Algunos modelos de este tipo presentan algoritmos de varios tipos de contaminantes y transporte de sedimentos, mientras que otros se dedican a un solo tipo (por ejemplo, sedimentos). Tienen también un amplio uso y un número considerable de aplicaciones que van desde su calibración y validación como instrumentos de análisis y gestión de cuencas a distintas escalas, hasta su aplicación para la

evaluación de la incidencia de impactos ambientales en la calidad del agua y la simulación de escenarios de cambio climático. Ejemplos de modelos hidrológicos de transporte son los modelos SWAT, AnnAGNPS y WEPP.

6. Referencias bibliográficas

- BERTENS, J., PASCUAL, J.A. y VAN BEEK, R. (2000). Modelización hidrológica de una cuenca mediterránea de media escala con el módulo PCRASTER DYNAMIC MODELLING. Cuadernos de Geografía, 67/68: 277-294.
<http://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/37841.pdf>
- BEVEN, K. (2012). *Rainfall-Runoff Modelling. The Primer*. Reino Unido, Wiley-Blackwell.
- BORAH, D.K. y BERA, M. (2003). Watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: review of mathematical bases. Transactions of the ASAE, 46 (6): 1553-1566.
<http://www.isws.illinois.edu/iswsdocs/journals/transasae46-6-1553-1566.pdf>
- BOULANGE, J., WATANABE, H., INAO, K., IWAFUNE, T., ZHANG, M., LUO, Y., y ARNOLD, J. (2014). Development and validation of a basin scale model PCPF-1@SWAT for simulating fate and transport of rice pesticides. Journal of Hydrology, 517: 146:156.
- CAI, T., LI, Q., YU, M., LU, G., CHENG, L. y WEI X. (2011). Investigation into the impacts of land-use change on sediment yield characteristics in the upper Huaihe River basin. *Physics and Chemistry of the Earth*, 53-54: 1-9.
http://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=4&cad=rja&uact=8&ved=0CDsQFjAD&url=http%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Fprofile%2FMeixiu_Yu%2Fpublication%2F251678713_Investigation_into_the_impacts_of_land-use_change_on_sediment_yield_characteristics_in_the_upper_Huaihe_River_basin_China%2Flinks%2F53da28670cf2e38c63365b67&ei=ekJ0VMW_JYLJaKvugNgL&usq=AFQjCNEMATaiCa_O8x1G10cxY89RR1garg&bvm=bv.80185997.d.d2s
- CAMICI, S., BROCCA, L., MELONE, F. Y MORAMARCO, T. (2014). Impact of

- Climate Change on Flood Frequency Using Different Climate Models and Downscaling Approaches. *Journal of Hydrologic Engineering*, 19 (8): 04014002-1-04014002-15.
https://www.researchgate.net/publication/259299035_Impact_of_climate_change_on_flood_frequency_using_different_climate_models_and_downscaling_approaches
- CHOW, V.T., MAIDMENT, D.R. y MAYS, L.W. (1994). Hidrología aplicada. UnitedStates, McGraw-Hill.
- DOMÍNGUEZ, V.M., FRANCO, N.A., CABALLERO, M.I., RODRÍGUEZ, X., SANTAMARÍA, E., y OLMOS, J. (2006). Modelo de gestión de cuencas para la prevención y control de la contaminación por 2,4-D y MCPA. En: *XXX Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental*. Uruguay, Asociación Interamericana de Ingeniería Sanitaria y Ambiental-AIDS,
http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/uruguay30/PA08246_Dominguez.pdf
- DONNER, S.D., COE, M.T., LENTERS, J.D., TWINE, T.E. y FOLEY, J.A. (2002). Modeling the impact of hydrological changes on nitrate transport in the Mississippi River Basin from 1955 to 1994. *Global Biogeochemical Cycles*, 16 (3): 1:19.
[http://yosemite.epa.gov/sab/sabhapp/nsf/e1853c0b6014d36585256dbf005c5b71/5dc5b4a00b689cb18525729f004fc590/\\$FILE/Donner%20etal2002.pdf](http://yosemite.epa.gov/sab/sabhapp/nsf/e1853c0b6014d36585256dbf005c5b71/5dc5b4a00b689cb18525729f004fc590/$FILE/Donner%20etal2002.pdf)
- EWEN, J., PAQRKIN, G. y O'CONNELL, P.E. (2000). SHETRAN: Distributed river basin flow and transport Modeling system. *Journal of Hydrologic Engineering*, 5 (3): 250-258.
http://research.ncl.ac.uk/shetran/SHETRAN_ASCE_paper.pdf
- FRANCÉS GARCÍA, F., VÉLEZ UPEGUI, J., CAMILO MÚNERA, J. MEDICI, C. y BUSSI, G. (2014). *Descripción del modelo conceptual distribuido de simulación hidrológica TETIS v.8*. España, Universidad Politécnica de Valencia.
- GAISERA, T., PRINTZB, A., SCHWARZ VON RAUMERB, H.G., GÖTZINGERC, J., DUKHOVNYD, V.A., BARTHEL, R., SOROKIND, A., TUCHIND, A., KIOURTSIDISE, C., GANOULISE, y I. STAHLRA, K. (2008). Development of a regional model for integrated management of water resources at the basin scale. *Physics and Chemistry of the Earth*, 33: 175-182.
https://www.researchgate.net/publication/222299985_Development_of_a_regional_model_for_integrated_management_of_water_resources_at_the_basin_scale
- KAMPF, S.K. y BURGESS, S.J. (2007). A framework for classifying and comparing distributed hillslope and catchment hydrologic models. *Water Resources Research*, 43, W05423, doi:10.1029/2006WR005370, 2007
<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2006WR005370/pdf>
- KIPTALA, J.K., MUL, M.L., MOHAMED, Y.A., y VAN DER ZAAG, P. (2014). Modelling stream flow and quantifying blue water using a modified STREAM model for a heterogeneous, highly utilized and data-scarce river basin in Africa. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18: 2287–2303.
<http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/18/2287/2014/hess-18-2287-2014.pdf>
- LÓPEZ-MORENO, J.I., VICENTE-SERRANO, S.M., MORAN-TEJEDA, E., ZABALZA, J., LORENZO-LACRUZ, J., Y GARCÍA-RUIZ, J.M. (2011). Impact of climate evolution and land use changes on water yield in the Ebro basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, 311-322, doi:10.5194/hess-15 (1) 311-322.
<http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/15/311/2011/hess-15-311-2011.pdf>
- MA, X., LU, X.X., VAN NOORDWIJK, M., LI, J.T. y XU, J.C. (2014). Attribution of climate change, vegetation restoration, and engineering measures to the reduction of suspended sediment in the Kejie catchment, southwest China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18: 1979-1994.
<http://www.hydrol-earth-syst-sci.net/18/1979/2014/hess-18-1979-2014.pdf>

- PINA, R., OCHOA, S., SIMÕES, N., MIJIC, A., SÁ MARQUES, A. y MAKSIMOVIĆ, Č. (2014). Semi-distributed or fully distributed rainfall-runoff models for urban pluvial flood modelling?. En: 13th International Conference on Urban Drainage, Sarawak, Malaysia, 7-12 September 2014.
https://spiral.imperial.ac.uk:8443/bitstream/10044/1/17972/2/2014_Pina_SD_FD_Models_ICUD_ID-2518686.pdf
- RE, M., BADANO, N.D., LECERTÚA, E., RE, F. y ÁNGEL N. (2008). Modelación matemática de una cuenca de llanura extensa. *Mecánica Computacional Vol XXVII*: 351-368.
<http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/1422/1387>
- ROSSO, R., RULLI, M.C. y BOCCHIOLA, D. (2007). Transient catchment hydrology after wildfires in a Mediterranean Basin: runoff, sediment and woody debris. *Hydrology and Earth System Sciences*, 11 (1): 125–140.
https://www.researchgate.net/publication/29626481_Transient_catchment_hydrology_after_wildfires_in_a_Mediterranean_basin_runoff_sediment_and_woody_debris
- SEIBERT, J., MCDONNELL, J.J. y WOODSMITH, R.D. (2010). Effects of wildfire on catchment runoff response: a modelling approach to detect changes in snow-dominated forested catchments. *Hydrology Research*, 41(5): 378-390.
http://www.fs.fed.us/pnw/pubs/journals/pnw_2010_seibert001.pdf
- SINGH, V.P. (1988). *Hydrologic Systems. Volume 1: Rainfall-runoff modelling*. United States, Prentice Hall.
- SOLOMATINE D.P. y WAGENER T. (2011). Hydrological Modeling. En: Peter Wilderer (ed.) *Treatise on Water Science, vol. 2*, pp. 435–457. Reino Unido Oxford: Academic Press.
- VÁZQUEZ, R.F., FEYEN, J. y BERLAMONT, J. (2004). Análisis de sensibilidad con MIKE SHE variando topografía y ET. *Ingeniería del agua*, 11 (3): 315-328.
<http://ojs.upv.es/index.php/IA/article/view/2540/2522>
- WAGESHO, N. (2014): Catchment dynamics and its impact on runoff generation: Coupling watershed modelling and statistical analysis to detect catchment responses. *International Journal of Water Resources and Environmental Engineering*, 6: 73-87.
<http://academicjournals.org/journal/IJWREE/article-full-text-pdf/A0E8CDF44848>
- WEBER, J.F., DASSO, C.M. y JORQUERA E. (2010). Desarrollo y calibración de un modelo hidrológico de simulación mixta. *Mecánica Computacional Vol XXIX*: 4013-4037.
<http://www.cimec.org.ar/ojs/index.php/mc/article/view/3280/3203>
- XU, C. (2002). *Hydrologic models*. Suecia, Uppsala University.
http://www.soil.tu-bs.de/lehre/Master.Unsicherheiten/2012/Lit/Hydrology_textbook.pdf

7. ANEXOS

7.1. ANEXO I. Características de 19 modelos hidrológicos de flujo

Fuente: Kampf y Burges (2007)

7.2. ANEXO II. Características de 11 modelos hidrológicos de transporte

Fuente: Borah y Bera (2003)

7.1. ANEXO I: Características de 19 modelos hidrológicos de flujo (Kampf y Burges, 2007)

Model	Sources	Subsurface ^a	Overland ^b	Channel ^b	Other Processes ^c	Solution ^d	Coupling (Surface-Subsurface) ^d	Space ^e	Time ^e
InHM	VanderKwaak [1999]	3-D U/S RE	2-D H/D DW	<i>Physical Models With 3-D Subsurface</i> 2-D DW DS ET		N/FE/FV	FO	TIN; H-C	E/C A
MODHMS	Panday and Hiyakorn [2004]	3-D U/S RE	2-D H/D DW	1-D DW, various shapes	DS IS ET	N/FD	FO, SIT, or SNIT linked through BC's	rectangular or curvilinear grid; H-C	E/C A
WASH123D	Yeh et al. [2004, 2006]	3-D U/S RE	2-D H/D DYW, DW, or KW	1-D H/D DYW, DW, or KW		N/FE	S	TIN; H-C	E/C
CATHY	Panicconi et al. [2003]	3-D U/S RE	1-D H/D DW	1-D DW	DS ET	N/FE subsurface N/FD surface	SNIT: Subsurface to surface	tetrahedral grid, subsurface network, surface H-C scale	E/C A subsurface; F surface
HYDRUS 2-D/3D	Šimunek et al. [2006]	3-D U/S RE	not simulated	not simulated	ET	N/FE	None; surface represented through atmospheric BC	TIN; H-C	E/C A
FEMWATER USEPA	Yeh et al. [1992]	3-D U/S RE	not simulated	not simulated	ET	N/FE	None; surface represented as variable BC	rectangular grid H-C	Transient or steady state; F or V
PIHM	Qu [2005]	1-D U 2-D S Two-state dynamic	2-D H/D DYW, DW or KW	1-D DYW, DW or KW	IS ET SN	N/FV	FO	TIN; H-C	E/C A
SHE	Abbott et al. [1986a, 1986b]	1-D U RE 2-D S B	2-D H/D DW	1-D DW	IS ET SN	N/FD	SIT	rectangular grid; H-C	E/C A/V for each component
GSSHA	Downer and Ogden [2004]	1-D U RE, I, or IR 2-D S	2-D H/D DW	1-D DW	DS IS ET SN	N/FV/FD	SNIT	rectangular grid; H-C	E/C A/V for each component
IHDM	Calver and Wood [1995]	2-D (XZ) U/S RE	1-D H/D KW	1-D KW		N/FE subsurface N/FD surface	SNIT linked through BC's	H-C	E/C F
WEHY	Karvas et al. [2004]	1-D U: (Z) I (X) K (subsurface stormflow) 2-D S B (regional)	1-D H/D KW	1-D DW	IS ET SN EB	N/FD	SNIT	hillslopes or first order watershed subunits with ensemble average parameters; large watershed, regional scale	E/C V for each component
TRIBS	Ivanov et al. [2004]	1-D U IR 1-D S analytical	1-D H/D analytical	1-D KW	<i>Analytical Surface/Subsurface Models</i> IS ET EB	N/FE channel D otherwise	SNIT	TIN H-C	E/C V for each component

Model	Sources	Subsurface ^a	Overland ^b	Channel ^b	Other Processes ^c	Solution ^d	Coupling (Surface-Subsurface) ^d	Space ^e	Time ^e
DHSVM	<i>Wignosta et al.</i> [1994, 2002]	1-D U analytical 2-D S analytical	2-D H/D E or unit graph	1-D E	IS ET EB SN D	D	SNIT	rectangular grid H-C	E/C F
CASC2D	<i>Julien et al.</i> [1995], <i>Ogden and Saghafian</i> [1997], <i>Ogden</i> [1998], <i>Senarath et al.</i> [2000]	1-D U I, IR, and/or SMA	2-D H DW	<i>Physical Surface Runoff Models</i> 1-D DYW or DW various shapes	DS IS ET	N/FD	surface runoff model; not coupled	rectangular grid H-C	E/C F
KINEROS	<i>Woolhiser et al.</i> [1990], <i>Smith et al.</i> [1995]	1-D U IR	1-D H KW	1-D KW various shapes	IS	N/FD	surface runoff model; not coupled	plane-channel network H-C	E A or F
THALES	<i>Grayson et al.</i> [1992a, 1995]	1-D U I 1-D S K	1-D H/D KW	<i>Analytical/Empirical Models With 1-D Surface and Subsurface</i> 1-D KW		N/FD	SNIT	Topographically defined stream tube network H-C	E/C F
TOPKAPI	<i>Ciarapica and Todini</i> [2002]	1-D U E 1-D S K	1-D D KW or E	1-D K	ET	N	SNIT	Network of cells H-C	F
PRMS	<i>Leavesley et al.</i> [1983], <i>Leavesley and Stannard</i> [1995]	1-D U I 1-D S E	1-D H KW or E	1-D KW or E	IS ET SN EB D	D	SNIT	network for storm mode; hydrologic response units for daily mode C	daily or storm mode (shorter time steps)
HEC-HMS	<i>USACE</i> [2001]	1-D U I, SMA	1-D H KW or E	1-D KW or E	DS IS ET	D	SNIT	network C	E/C F

^aSubsurface abbreviations: U, unsaturated zone; S, saturated zone; RE, Richards' equation; B, Boussinesq equation; I, infiltration; IR, infiltration with redistribution; SMA, soil moisture accounting; D-F, Dupuit-Forchheimer; K, kinematic; E, empirical.

^bSurface abbreviations: H, Horton; D, Dunne; DYW, dynamic wave; DW, diffusion wave approximation; KW, kinematic wave approximation; E, empirical.

^cOther abbreviations: DS, depression storage; IS, interception storage; ET, evapotranspiration; SN, snow accumulation and melt; EB, energy balance.

^dSolution/coupling abbreviations: N, numerical; FD, finite difference; FE, finite element; IT, iterative; D, direct; FO, first order; S, sequential; SIT, sequential iterative; SNIT, sequential noniterative; BC, boundary condition.

^eSpace/time abbreviations: H-C, hillslope-catchment; E, event; E/C, either event or continuous; A, adaptive time stepping; V, variable time steps; F, fixed time steps.

7.2. ANEXO II. Características de 11 modelos hidrológicos de transporte (Borah y Bera, 2003)

Table 1. Summary of watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: continuous models.

Description/ Criteria	AnnAGNPS	ANSWERS- Continuous	HSPF	MIKE SHE	SWAT
Model components/ capabilities	Hydrology, transport of sediment, nutrients, and pesticides resulting from snowmelt, precipitation and irrigation, source accounting capability, and user interactive programs including TOPAGNPS generating cells and stream network from DEM.	Daily water balance, infiltration, runoff and surface water routing, drainage, river routing, ET, sediment detachment, sediment transport, nitrogen and phosphorous transformations, nutrient losses through uptake, runoff, and sediment.	Runoff and water quality constituents on pervious and impervious land areas, movement of water and constituents in stream channels and mixed reservoirs, and part of the USEPA BASINS modeling system with user interface and ArcViewGIS platform.	Interception-ET, overland and channel flow, unsaturated zone, saturated zone, snowmelt, exchange between aquifer and rivers, advection and dispersion of solutes, geochemical processes, crop growth and nitrogen processes in the root zone, soil erosion, dual porosity, irrigation, and user interface with pre- and post-processing, GIS, and UNIRAS for graphical presentation.	Hydrology, weather, sedimentation, soil temperature, crop growth, nutrients, pesticides, agricultural management, channel and reservoir routing, water transfer, and part of the USEPA BASINS modeling system with user interface and ArcViewGIS platform.
Temporal scale	Long term; daily or sub-daily steps.	Long term; dual time steps: daily for dry days and 30 seconds for days with precipitation.	Long term; variable constant steps (hourly).	Long term and storm event; variable steps depending numerical stability.	Long term; daily steps.
Watershed representation	Homogeneous land areas (cells), reaches, and impoundments.	Square grids with uniform hydrologic characteristics, some having companion channel elements; 1-D simulations.	Pervious and impervious land areas, stream channels, and mixed reservoirs; 1-D simulations.	2-D rectangular/square overland grids, 1-D channels, 1-D unsaturated and 3-D saturated flow layers.	Sub-basins grouped based on climate, hydrologic response units (lumped areas with same cover, soil, and management), ponds, groundwater, and main channel.
Rainfall excess on overland/ water balance	Water balance for constant sub-daily time steps and two soil layers (8-in. tillage depth and user-supplied second layer).	Daily water balance, rainfall excess using interception, Green-Ampt infiltration equation, and surface storage coefficients.	Water budget considering interception, ET, and infiltration with empirically based areal distribution.	Interception and ET loss and vertical flow solving Richards equation using implicit numerical method.	Daily water budget; precipitation, runoff, ET, percolation, and return flow from subsurface and groundwater flow.
Runoff on overland	Runoff curve number generating daily runoff following SWRRB and EPIC procedures and SCS TR-55 method for peak flow.	Manning and continuity equations (temporarily variable and spatially uniform) solved by explicit numerical scheme.	Empirical outflow depth to detention storage relation and flow using Chezy-Manning equation.	2-D diffusive wave equations solved by an implicit finite-difference scheme.	Runoff volume using curve number and flow peak using modified Rational formula or SCS TR-55 method.
Subsurface flow	Lateral subsurface flow using Darcy's equation or tile drain flow using Hooghoudt's equation and parallel drain approximation.	Subsurface flow defined by tile drainage coefficient and groundwater or interflow release fraction; unsaturated zone drainage determined using Darcy's gravity flow.	Interflow outflow, percolation, and groundwater outflow using empirical relations.	3-D groundwater flow equations solved using a numerical finite-difference scheme and simulated river-groundwater exchange.	Lateral subsurface flow using kinematic storage model (Sloan et al., 1983), and groundwater flow using empirical relations.
Runoff in channel	Assuming trapezoidal and compound cross-sections, Manning's equation is numerically solved for hydraulic parameters and TR-55 for peak flow.	Manning and continuity equations (temporarily variable and spatially uniform) solved by explicit numerical scheme.	All inflows assumed to enter one upstream point, and outflow is a function of reach volume or user-supplied demand.	1-D diffusive wave equations solved by an implicit finite-difference scheme.	Routing based on variable storage coefficient method and flow using Manning's equation adjusted for transmission losses, evaporation, diversions, and return flow.

Table 1. Summary of watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: continuous models (continued).

Description/ Criteria	AnnAGNPS	ANSWERS- Continuous	HSPF	MIKE SHE	SWAT
Flow in reservoir	Average outflow during runoff event is calculated based on permanent pool storage and stage, runoff volume, and coefficients derived from elevation-storage relation.	Not simulated.	Same as channel.	No information.	Water balance and user-provided outflow (measured or targeted).
Overland sediment	Uses RUSLE to generate sheet and rill erosion daily or user-defined runoff event, HUSLE for delivery ratio, and sediment deposition based on size distribution and particle fall velocity.	Raindrop detachment using rainfall intensity and USLE factors, flow erosion using unit-width flow and USLE factors, and transport and deposition of sediment sizes using modified Yalin's equation.	Rainfall splash detachment and wash off of the detached sediment based on transport capacity as function of water storage and outflow plus scour from flow using power relation with water storage and flow.	No information.	Sediment yield based on Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) expressed in terms of runoff volume, peak flow, and USLE factors.
Channel sediment	Modified Einstein equation for sediment transport and Bagnold equation to determine transport capacity of flow.	Not simulated.	Non-cohesive (sand) sediment transport using user-defined relation with flow velocity or Toffaleti or Colby method, and cohesive (silt, clay) sediment transport based on critical shear stress and settling velocity.	No information.	Bagnold's stream power concept for bed degradation and sediment transport, degradation adjusted with USLE soil erodibility and cover factors, and deposition based on particle fall velocity.
Reservoir sediment	Sediment deposition based on constant detention discharge, zero transport capacity, and dilution with pool water.	Not simulated.	Same as channel.	No information.	Outflow using simple continuity based on volumes and concentrations of inflow, outflow, and storage.
Chemical simulation	Soil moisture, nutrients, and pesticides in each cell are tracked using NRCS soil databases and crop information, and reach routing includes fate and transport of nitrogen, phosphorous, and individual pesticides, and organic carbon.	Nitrogen and phosphorous transport and transformations through mineralization, ammonification, nitrification, and denitrification, and losses through uptake, runoff, and sediment.	Soil and water temperatures, dissolved oxygen, carbon dioxide, nitrate, ammonia, organic N, phosphate, organic P, pesticides in dissolved, adsorbed, and crystallized forms, and tracer chemicals chloride or bromide to calibrate solute movement through soil profiles.	Dissolved conservative solutes in surface, soil, and ground waters by solving numerically the advection-dispersion equation for the respective regimes.	Nitrate-N based on water volume and average concentration, runoff P based on partitioning factor, daily organic N and sediment adsorbed P losses using loading functions, crop N and P use from supply and demand, and pesticides based on plant leaf-area-index, application efficiency, wash off fraction, organic carbon adsorption coefficient, and exponential decay according to half lives.
BMP evaluation	Agricultural management.	Impact of watershed management practices on runoff and sediment losses.	Nutrient and pesticide management.	No information.	Agricultural management: tillage, irrigation, fertilization, pesticide applications, and grazing.

Table 2. Summary of watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: single-event models.

Description/ Criteria	AGNPS	ANSWERS	CASC2D	DWSM	KINEROS	PRMS Storm Mode
Model components/ capabilities	Hydrology, soil erosion, and transport of sediment, nitrogen, phosphorous, and chemical oxygen demand from nonpoint and point sources, and user interface for data input and analysis of results.	Runoff, infiltration, subsurface drainage, soil erosion, and overland sediment transport.	Spatially varying rainfall inputs including radar estimates, rainfall excess and 2-D flow routing on cascading overland grids, continuous soil moisture accounting, diffusive wave or full-dynamic channel routing, upland erosion, sediment transport in channels, and part of U.S. Army Corps of Engineers' Watershed Modeling System with graphical user interface and GIS data processing.	Spatially varying rainfall inputs; individual hyetograph for each overland, rainfall excess, surface and subsurface overland flow, surface erosion and sediment transport, agrochemical mixing and transport, channel erosion and deposition and routing of flow, sediment, and agrochemical and flow routing through reservoirs.	Distributed rainfall inputs; each catchment element assigned to a rain gauge from a maximum of 20, rainfall excess, overland flow, channel routing, surface erosion and sediment transport, channel erosion and sediment transport, flow and sediment routing through detention structures.	Hydrology and surface runoff, channel flow, channel reservoir flow, soil erosion, overland sediment transport, and linkage to USGS data-management program ANNIE for formatting input data and analyzing simulated results.
Temporal scale	Storm event; one step is the storm duration.	Storm event; variable constant steps depending numerical stability.	Long term and storm event; variable steps depending numerical stability.	Storm event; variable constant steps.	Storm event; variable constant steps depending numerical stability.	Storm event; variable constant steps depending numerical stability.
Watershed representation	Uniform square areas (cells), some containing channels.	Square grids with uniform hydrologic characteristics, some having companion channel elements; 1-D simulations.	2-D square overland grids and 1-D channels.	Overland, channel, and reservoir segments defined by topographic-based natural boundaries; 1-D simulations.	Runoff surfaces or planes, channels or conduits, and ponds or detention storage; 1-D simulations.	Flow planes, channel segments, and channel reservoirs; 1-D simulations.
Rainfall excess on overland	Runoff curve number method.	Surface detention with empirical relations and infiltration with modified Holton-Overton relation.	Interception and ET loss, infiltration using Green-Ampt method, and overland flow retention.	Two options: simple runoff curve number procedure for computing time varying rainfall intensities, or extensive interception and Smith-Parlange infiltration procedure.	Interception loss and extensive infiltration procedure by Smith and Parlange.	Interception and infiltration using an empirically based areal distribution of point infiltration (Green-Ampt equation), similar to HSPF.
Runoff on overland	Runoff volume using runoff curve number, and flow peak using an empirical relation similar to Rational formula or SCS TR-55 method.	Manning and continuity equations (temporarily variable and spatially uniform) solved using an explicit numerical scheme.	2-D diffusive wave equations solved by explicit finite-difference scheme.	Kinematic wave equations solved using analytical and an approximate shock-fitting solutions.	Kinematic wave equations solved by an implicit numerical scheme.	Kinematic wave equations solved using a numerical scheme.

Table 2. Summary of watershed-scale hydrologic and nonpoint-source pollution models: single-event models (continued).

Description/ Criteria	AGNPS	ANSWERS	CASC2D	DWSM	KINEROS	PRMS Storm Mode
Subsurface flow	Not simulated.	Water moving from a control zone to tile drainage and groundwater release or interflow depending on infiltration rate, total porosity, and field capacity.	Not simulated.	Combined interflow, tile drain flow, and base flow using Sloan et al. (1983) kinematic storage equation and spatially uniform and temporarily varying continuity equation.	Not simulated.	No subsurface simulation in the storm mode.
Runoff in channel	Included in the overland cells.	Same as overland.	Two options: 1-D diffusive wave equations solved by explicit finite-difference method mostly for headwater channels, or implicit finite-difference solution of the 1-D full dynamic equations for limited subcritical flows.	Same as overland.	Same as overland.	Same as overland.
Flow in reservoir	Flow routing through impoundments associated with terrace systems having pipe outlets.	Not simulated.	Not simulated.	Modified-Puls method; solving analytically the temporarily varying and spatially uniform continuity equation.	Finite difference solution of the temporarily varying and spatially uniform continuity equation.	Modified-Puls method; solving the temporarily varying and spatially uniform continuity equation.
Overland sediment	Soil erosion using USLE and routing of clay, silt, sand, and small and large aggregates through cells based on steady-state continuity, effective transport capacity from a modification of the Bagnold stream power equation, fall velocity, and Manning's equation.	Raindrop detachment using USLE factors and flow erosion and transport of four sizes (0.01 to 0.30 mm) using modified Yalin's equation and an explicit numerical solution of the steady-state continuity equation.	Soil erosion and sediment deposition are computed using modified Kiline-Richardson equation with USLE factors and conservation of mass.	Raindrop detachment and sediment transport, scour, and deposition of user-specified particle size groups based on sediment transport capacity and approximate analytical solution of temporarily and spatially varying continuity equation.	Raindrop detachment and sediment transport, scour, and deposition of one particle size based on sediment transport capacity and explicit numerical solution of temporarily and spatially varying continuity equation.	Raindrop detachment based on rainfall intensity, overland flow detachment based on transport capacity, and routing based on sediment continuity.
Channel sediment	Included in overland cells.	Assumed negligible and not simulated.	Sand-size total sediment load is computed using Yang's unit stream power method.	Streambed scour/deposition and sediment transport of the same size groups based on sediment transport capacity and approximate analytical solution of temporarily and spatially varying continuity equation.	Streambed scour/deposition and sediment transport of the same sediment size based on sediment transport capacity and explicit numerical solution of temporarily and spatially varying continuity equation.	Sediment delivered from flow planes is transported as conservative substance without detachment and deposition.

PARTE 2: La aplicación práctica del modelo HEC-HMS

1. Introducción

Para el desarrollo del siguiente caso práctico se utilizarán las siguientes versiones de los programas:

- ArcGIS 10.x.
- HEC-HMS 4.1.
- HEC-GeoHMS 10.x for ArcGIS 10.x.

Tanto HEC-HMS como HEC-GeoHMS son software libre y pueden descargarse en las siguientes páginas web:

- HEC-HMS: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-hms/downloads.aspx>
- HEC-GeoHMS: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-geohms/downloads.aspx>

2. Enunciado del ejercicio

Calcular el hidrograma asociado al periodo de retorno de 10 años del río Alberche en régimen natural a su paso por el término municipal de Nombela (Toledo).

3. Planteamiento del ejercicio

Para resolver el problema vamos a crear un modelo hidrológico mediante HEC-HMS (HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 2015) cuyo resultado final es un hidrograma que nos dará el caudal pico asociado al periodo de retorno $T=10$. Como se trata de un modelo en régimen natural, deben despreciarse los embalses existentes en la cuenca.

Una de las principales entradas al modelo son los datos espaciales que caracterizan cada una de las subcuencas: superficie, longitud de cauce más largo, pendiente, etc. Estos datos se obtendrán a partir de un Modelo Digital del Terreno mediante HEC-GeoHMS (HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 2013) y se importarán directamente a HEC-HMS.

En los siguientes apartados se enunciarán las diferentes partes o submodelos que conforman el modelo HEC-HMS, los posibles métodos de cálculo de los parámetros hidrológicos (indicando cuál de ellos se va a utilizar), así como la información de partida que será necesaria para completar cada submodelo.

Posteriormente se indica el tratamiento que hay que dar a los datos de partida para obtener los parámetros de entrada al modelo.

Finalmente se explica cómo se introducen los parámetros en el modelo, cómo se realiza la calibración del modelo a partir de datos registrados y cómo se consultan los resultados tras la simulación.

4. Descripción del modelo HEC-HMS

A grandes rasgos, el modelo HEC-HMS se estructura en los siguientes submodelos:

4.1. Modelo de cuencas (Basin Model)

Este modelo se divide en cuatro elementos:

- Subcuencas (*Subbasin*): para definir cada subcuenca necesitamos los siguientes datos:
 - ✓ *Description*: pequeña descripción de la cuenca. No es imprescindible.
 - ✓ *Latitude Degrees, Latitude Minutes, Latitude Seconds, Longitude Degrees, Longitude Minutes, Longitude Seconds*: indica la localización de la cuenca. No es imprescindible.
 - ✓ *Downstream*: indica el elemento del modelo al que se conectará aguas abajo cada una de las subcuencas. Esta conexión quedará definida mediante el esquema de red hidrográfica que se genera con HEC-GeoHMS.
 - ✓ *Area (KM2)*: superficie de la subcuenca en km². Se obtiene mediante HEC-GeoHMS.
 - ✓ *Canopy Method*: representa la cantidad de agua de lluvia que queda interceptada por la cubierta vegetal y no llega al terreno. En el modelo despreciaremos este factor.
 - ✓ *Surface Method*: representa la cantidad de agua de lluvia que queda almacenada en depresiones del terreno. En el modelo despreciaremos este factor.
 - ✓ *Loss Method*: representa la cantidad de agua de lluvia que se infiltra en el terreno. En el modelo seleccionaremos el método *SCS Curve Number*. Los valores de Número de Curva de cada subcuenca se calculan según la metodología que posteriormente se explicará, utilizando ArcGIS.
 - ✓ *Transform Method*: representa la cantidad de lluvia neta que se transforma en escorrentía. En el modelo seleccionaremos el método *SCS Unit Hydrograph*. Este método se basa en el parámetro T-Lag (tiempo de retardo), que se calcula a partir del tiempo de concentración, que a su vez se calcula con los resultados obtenidos en HEC-GeoHMS.
 - ✓ *Baseflow Method*: representa la escorrentía que existe en el cauce antes de producirse la avenida. En el modelo seleccionaremos el método *Recession*. El principal dato de entrada es el caudal inicial (*Initial Discharge*), que se calculará mediante ArcGIS partiendo del Mapa de escorrentía total anual.
- Tramos de cauce (*Reach*): para definir cada tramo necesitamos los siguientes datos:
 - ✓ *Downstream*: es el elemento del modelo al que se conectará aguas abajo cada tramo de cauce. Esta conexión quedará definida mediante el esquema de red hidrográfica que se calcula con HEC-GeoHMS.
 - ✓ *Description*: pequeña descripción del tramo. No es imprescindible.
 - ✓ *Routing Method*: representa cómo evoluciona el hidrograma entrante en la cabecera del tramo a medida que discurre a lo largo del cauce, experimentando fundamentalmente cierto retardo y atenuación. En el modelo seleccionaremos el método *Muskingum-Cunge*. Los datos de entrada se obtendrán a partir del Modelo Digital del Terreno, mediante ArcGIS.
 - ✓ *Loss/Gain Method*: representa las pérdidas o ganancias de caudal que pueden producirse a lo largo del tramo de cauce. En el modelo despreciaremos este factor.
- Confluencias (*Junction*): para definir cada confluencia necesitamos los siguientes datos:
 - ✓ *Description*: pequeña descripción de la confluencia. No es imprescindible.

- ✓ *Downstream*: es el elemento del modelo al que se conectará aguas abajo cada confluencia. Esta conexión quedará definida mediante el esquema de red hidrográfica que se calcula con HEC-GeoHMS.
- Salida (*Sink*): para definir la salida necesitamos los siguientes datos:
 - ✓ *Description*: pequeña descripción del punto de salida. No es imprescindible.El programa HEC-HMS permite introducir otros elementos como embalses (*Reservoir*), fuentes (*Source*) o derivaciones (*Diversion*), que no utilizaremos en este ejercicio práctico.

4.2. Modelo Meteorológico (Meteorologic Model)

Para definir el modelo necesitamos los siguientes datos:

- ✓ *Description*: pequeña descripción del modelo. No es imprescindible.
- ✓ *Shortwave*: representa la radiación solar de onda corta. En el modelo despreciaremos este factor.
- ✓ *Longwave*: representa la radiación solar de onda larga. En el modelo despreciaremos este factor.
- ✓ *Precipitation*: representa la precipitación en forma de lluvia. En el modelo seleccionaremos el método *Specified Hyetograph*. El dato de entrada es el hietograma, que se obtendrá a partir de los datos facilitados por la AEMET.
- ✓ *Evapotranspiration*: representa la cantidad de agua que se pierde mediante evapotranspiración. En el modelo despreciaremos este factor.
- ✓ *Snowmelt*: representa el aporte de agua en forma de nieve. En el modelo despreciaremos este factor.
- ✓ *Unit System*: seleccionamos *Metric*.
- ✓ *Replace Missing*: representa la manera de gestionar la falta de datos meteorológicos. En el modelo seleccionaremos *Abort Compute*, que cancela el cálculo en caso de falta de datos.
- ✓ *Basin*: en esta pestaña se selecciona el modelo de cuenca asociado al modelo meteorológico.
- ✓ *Option*: en esta pestaña se selecciona si se quieren ajustar los datos de precipitación de cada medida. En el modelo seleccionamos *No*.

4.3. Especificaciones de Control (Control Specifications)

Para definir el modelo necesitamos los siguientes datos:

- ✓ *Description*: pequeña descripción. No es imprescindible.
- ✓ *Start Date, Start Time, End Date, End Time*: indican la hora y el día que comienza la simulación.
- ✓ *Time Interval*: seleccionamos *1 Hour*.

5. Datos de partida

A continuación se indican los datos de partida necesarios para el desarrollo del ejercicio, así como los lugares de donde se pueden obtener para así poder realizar estudios en otras zonas de la geografía española. Estos datos se adjuntan en formato digital en el siguiente enlace:

<https://drive.google.com/file/d/0B62MEhCydHW3UFlka3MzM2dFZnM/view?usp=sharing>

5.1. Modelo Digital del Terreno

Descripción: Modelo Digital del Terreno de la cuenca con paso de malla de 25 m. Archivos con formato ASCII matriz ESRI (asc).

Fuente: Centro de Descargas del Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG, 2009).

Enlace:

<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/buscadorCatalogo.do?codFamilia=02107>

Nombre del archivo: son 24 archivos con la siguiente denominación: MDT25-XXXX-H30, siendo XXXX el número de hoja en el MTN50.

5.2. Mapa de cauces

Descripción: Red hidrográfica principal de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Tajo.

Fuente: Confederación Hidrográfica del Tajo (2016).

Enlace: <http://www.chtajo.es/Servicios/Paginas/DescargaDCapas.aspx>

Nombre del archivo: Red_hidro_ppal_v.shp

Observaciones: este mapa no es imprescindible, ya que los principales cauces de la cuenca se obtendrán de HEC-GeoHMS, pero puede ser de gran utilidad para la definición de las subcuencas.

5.3. Mapa de usos del suelo del CORINE

Descripción: Mapa de ocupación del suelo en España, correspondiente al proyecto europeo Corine Land Cover.

Fuente: Agencia Europea de Medio Ambiente (2006).

Enlace:

<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/buscadorCatalogo.do?codFamilia=02113>

Nombre del archivo: CLC06_es.shp.

5.4. Mapa de grupos hidrológicos

Descripción: Mapa de grupos hidrológicos de España.

Fuente: Norma 5.2 - IC Drenaje Superficial de la Instrucción de Carreteras (BOE, 2016a).

Enlace: <https://www.boe.es/boe/dias/2016/03/10/pdfs/BOE-A-2016-2405.pdf>

Nombre del archivo: BOE-A-2016-2405 (figura 2.7).

5.5. Localización de estaciones meteorológicas

Descripción: Mapa de localización de estaciones meteorológicas.

Fuente: Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios (SIGA) (MAPAMA, 2016a).

Nombre del archivo: Estaciones_ETRS89.shp

Observaciones: El archivo incluye exclusivamente las estaciones de la zona de estudio, en el sistema ETRS89. Como se verá más adelante, este archivo no es necesario para resolver el ejercicio.

5.6. Hietogramas de diseño

Descripción: Hietogramas de diseño de cada subcuenca.

Fuente: los hietogramas se han elaborado partiendo de los datos de precipitación máxima diaria mensual facilitados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET, 2016), tal y como se explicará más adelante.

Nombre del archivo: Hietogramas.xlsx

Observaciones: Según Resolución de 30 de diciembre de 2015, de la Agencia Estatal de Meteorología, por la que se establecen los precios públicos que han de regir la prestación de servicios meteorológicos y climatológicos, publicada en el BOE núm. 4 de 5 de enero de 2016 (BOE, 2016b), los datos de precipitación máxima diaria mensual son gratuitos.

5.7. Escorrentía total anual

Descripción: Mapa de escorrentía total anual. Archivo ráster.

Fuente: Sistema Integrado de Modelización Precipitación Aportación (SIMPA) (MAPAMA, 2016b).

Enlace: <http://www.mapama.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/simpa.aspx>

Nombre del archivo: aes4005.

5.8. Correspondencia de usos del suelo entre CORINE y SCS

Descripción: Tabla Excel con la correspondencia entre los usos del suelo definidos por el mapa CORINE y por el SCS.

Fuente: Aportación de la teledetección para la determinación del parámetro hidrológico del número de curva (Ferrer *et al.*, 1998).

Nombre del archivo: Correspondencia_usos_suelo.xlsx

5.9. Asignación de valores de Número de Curva

Descripción: Tabla Excel con la correspondencia entre los códigos del método de los números primos y el número de curva.

Fuente: Generación automática del número de curva con sistemas de información geográfica (Ferrer *et al.*, 1995).

Nombre del archivo: Número_curva.xlsx

5.10. Secciones transversales del cauce

Descripción: Secciones transversales característica de cada tramo del cauce principal.

Fuente: se elaboran a partir del Modelo Digital del Terreno mediante ArcGIS.

Nombre del archivo: Muskingum-Cunge.xlsx.

Observaciones: estas secciones son necesarias para calcular el tránsito del hidrograma a lo largo del cauce principal del río Alberche.

5.11. Tormenta registrada

Descripción: Datos de precipitaciones y caudales registrados en la estación AR22 Cofio en San Martín entre los días 20 y 24 de abril de 2011.

Fuente: Sistema Automática de Información Hidrológica (SAIH) (MAPAMA, 2016c).

Enlace: <http://sig.mapama.es/saih/>

Nombre del archivo: Datos_calibración.xlsx

Observaciones: esta información se utilizará para la calibración del modelo. El archivo incluye dos pestañas, una de precipitaciones y otra de caudales registrados. Se ha seleccionado un intervalo temporal de una hora.

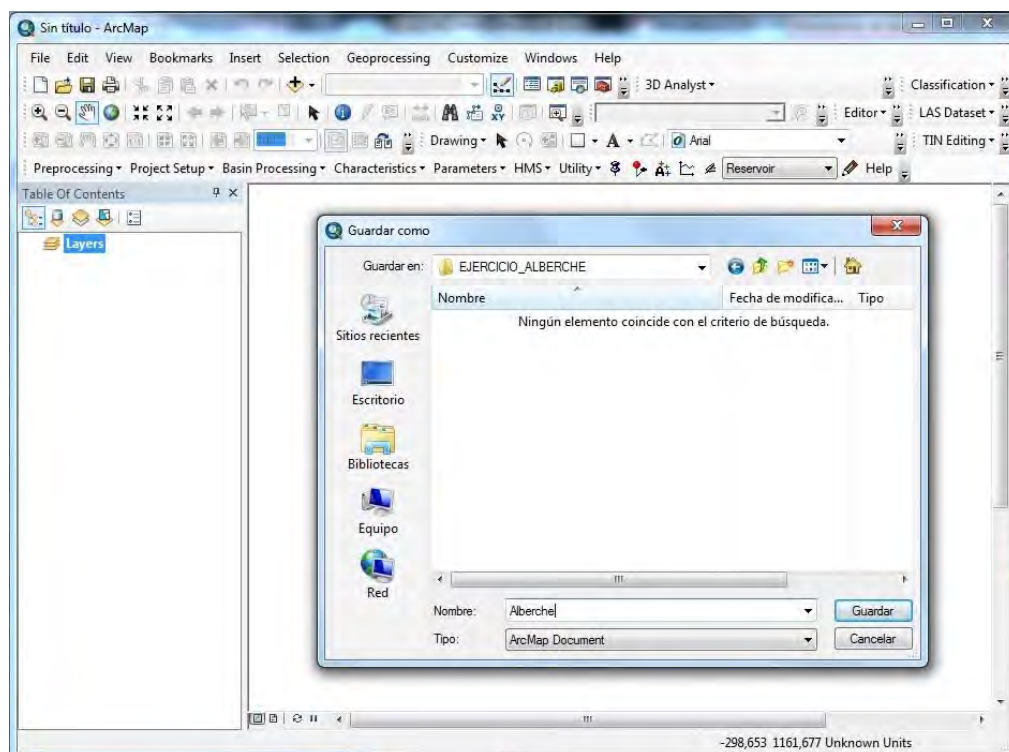
6. Tratamiento de los datos de partida

6.1. Pasos previos

Paso 1. Creación de un proyecto en ArcGIS

Creamos una carpeta de trabajo que llamamos EJERCICIO_ALBERCHE y dentro de ella generamos un archivo con el nombre Alberche. Es importante que esta carpeta esté lo más próxima posible a la raíz C:\ y que no tenga espacios blancos ni tildes en el nombre.

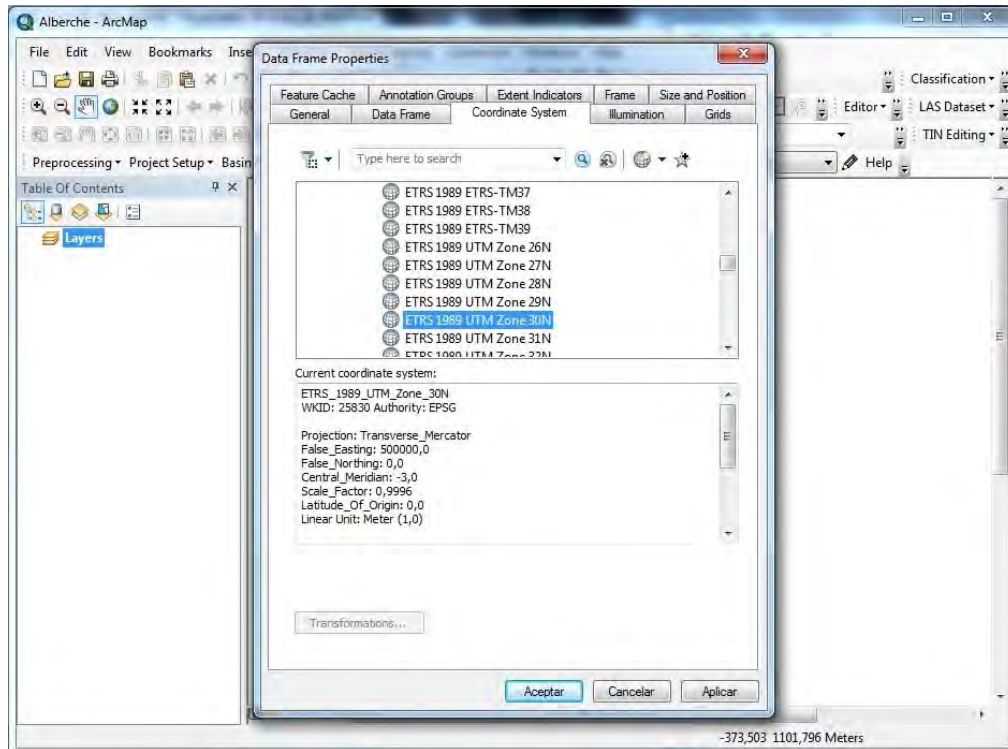
File → Save As



Paso 2. Definición del sistema de coordenadas

Pinchamos con el botón derecho del ratón, en la parte izquierda de la pantalla, sobre *Layers*.


Properties → *Coordinate System* → *Projected Coordinated Systems* → *UTM* → *Europe* → *ETRS 1989 UTM Zone 30 N*

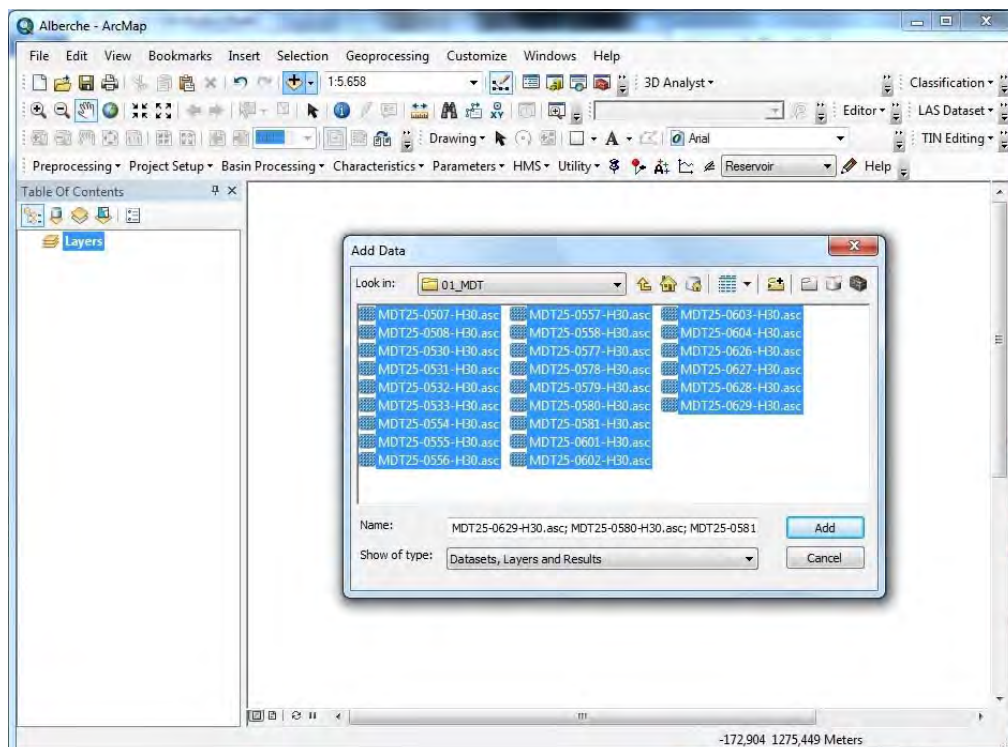


6.2. Definición de las características de la cuenca y las subcuencas

6.2.1. Delimitación previa de subcuencas y líneas de drenaje

Paso 1. Carga de los diferentes archivos del MDT

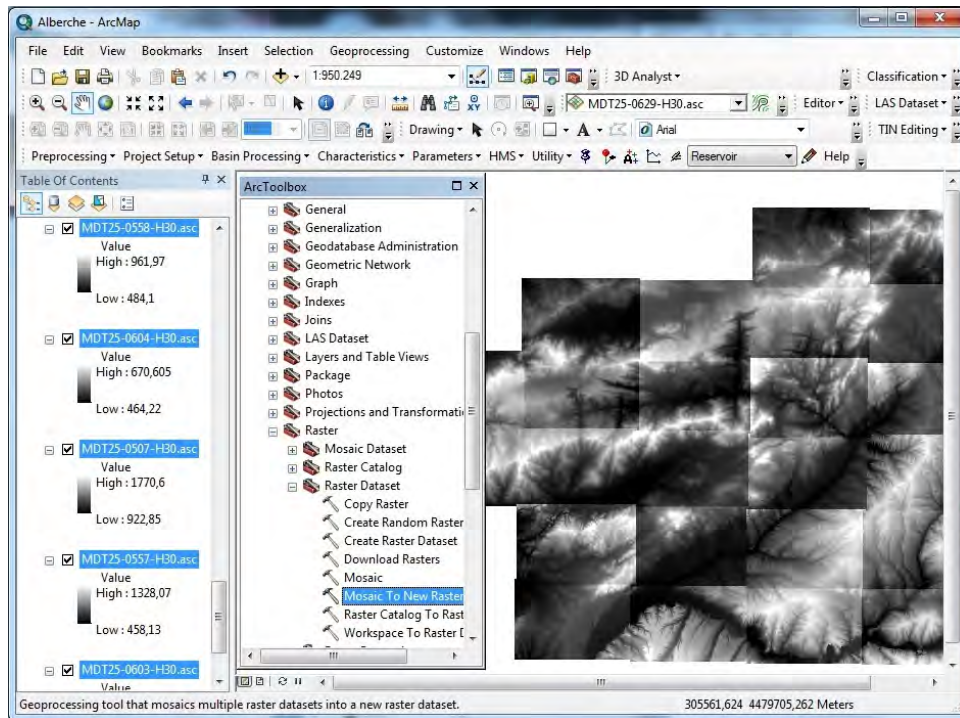
File → *Add Data* → *Add Data* o 



Paso 2. Unión de todos los archivos en uno único

Abrimos *ArcToolbox* en el icono 

Data Management Tools → Raster → Raster Dataset → Mosaic to New Raster



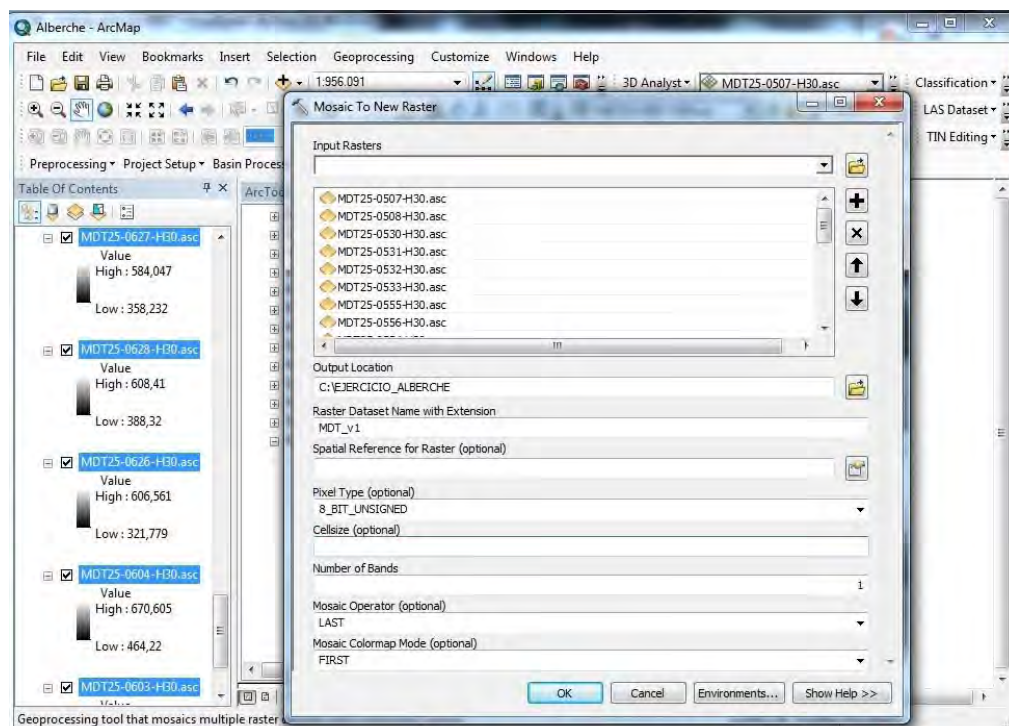
En *Input Rasters* seleccionamos los 24 archivos.

En *Output Location* elegimos la carpeta de trabajo (EJERCICIO_ALBERCHE).

En *Raster Dataset Name with Extension* damos el nombre al archivo (MDT_v1).

En *Number of Bands* ponemos 1.

En el resto de casillas dejamos los valores por defecto.

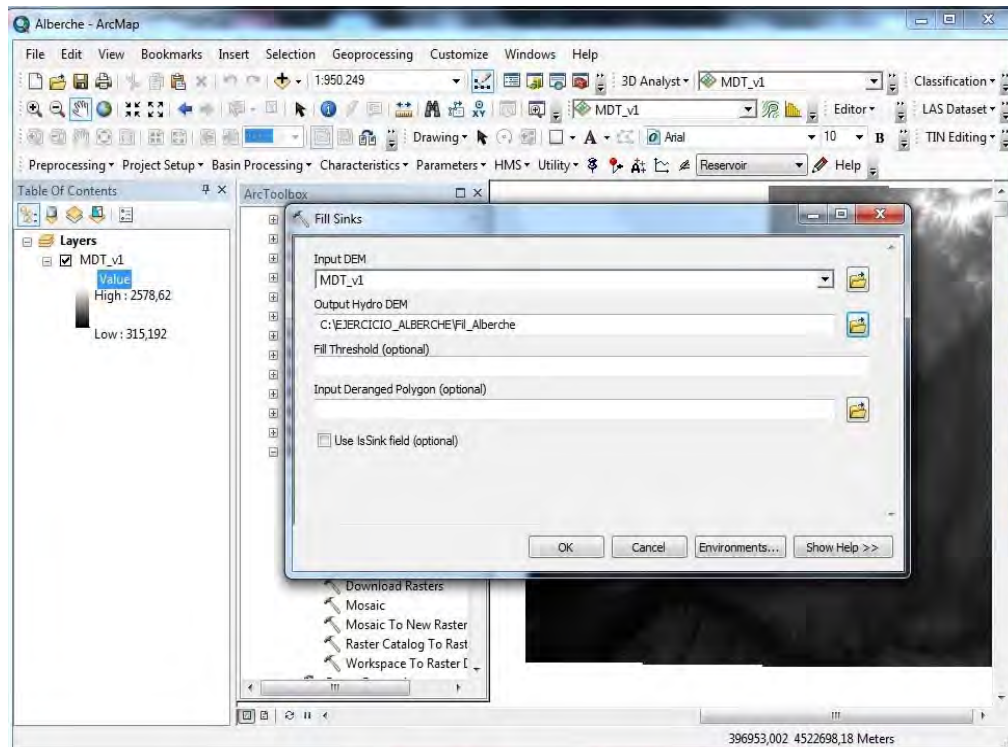


Paso 3. Eliminación de las depresiones del MDT

Con este proceso se aumenta la cota de las celdas que están rodeadas completamente de celdas con mayor cota, asignando a dicha celda la menor cota de las celdas circundantes.

En el menú de HEC-GeoHMS pinchamos en *Preprocessing*.

Preprocessing → *Fill Sinks*



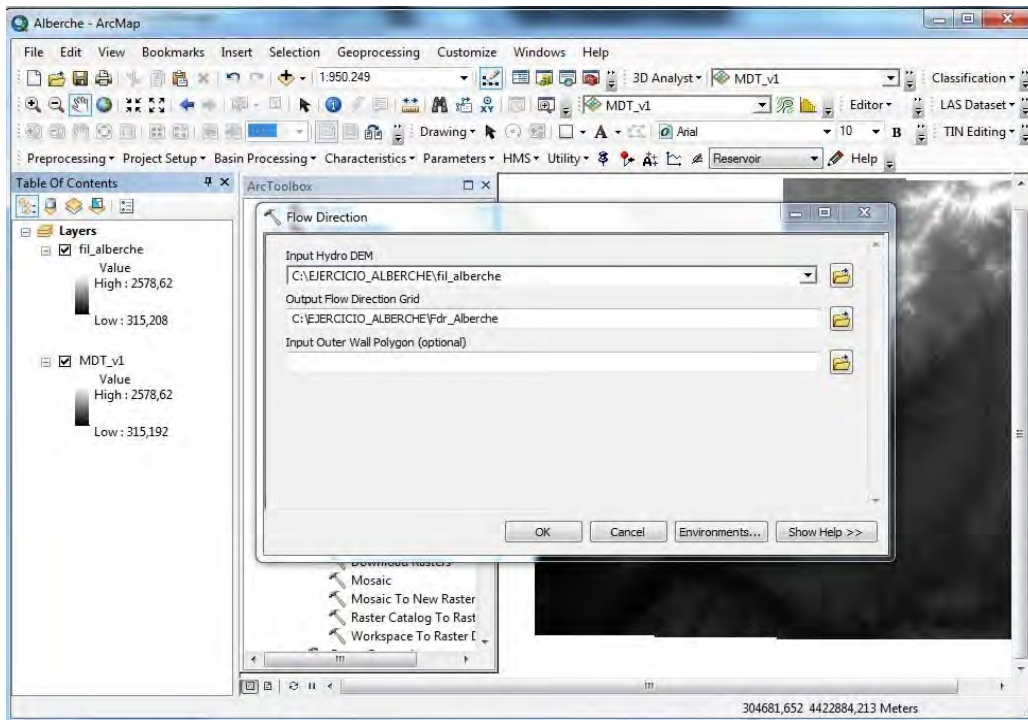
En *Input DEM* seleccionamos MDT_v1.

En *Output Hydro DEM* elegimos la carpeta de trabajo y el nombre del archivo (Fil_Alberche).

Paso 4. Cálculo de las direcciones de flujo

Se define la dirección de la mayor pendiente, evaluando celda a celda las cotas de las celdas circundantes a cada una de ellas.

Preprocessing → Flow Direction



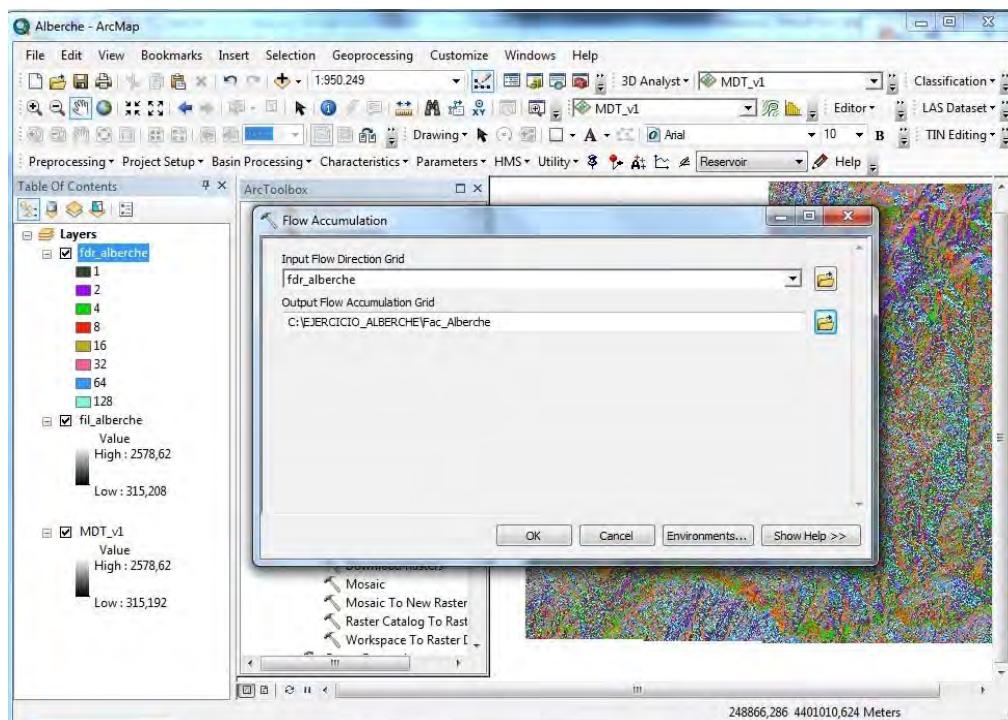
En *Input Hydro DEM* seleccionamos *fil_alberche*.

En *Output Flow Direction Grid* elegimos la carpeta de trabajo y el nombre del archivo (*Fdr_Alberche*).

Paso 5. Cálculo de la acumulación de flujo

Se determina el número de celdas que drenan a cada celda, de manera que se puede calcular el área de drenaje de una celda dada multiplicando el número de celdas por el área de cada una.

Preprocessing → Flow Accumulation

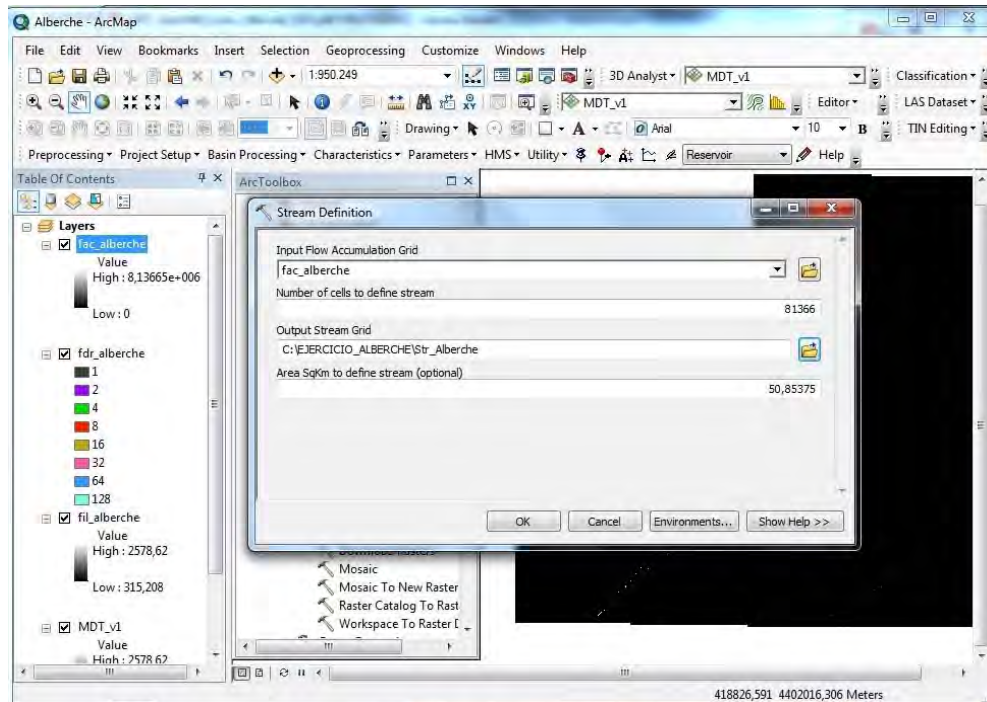


En *Input Flow Direction Grid* seleccionamos *fdr_alberche*.

En *Output Flow Accumulation Grid* elegimos la carpeta de trabajo y el nombre del archivo (*Fac_Alberche*).

Paso 6. Definición de tramos de cauce

Preprocessing → Stream Definition

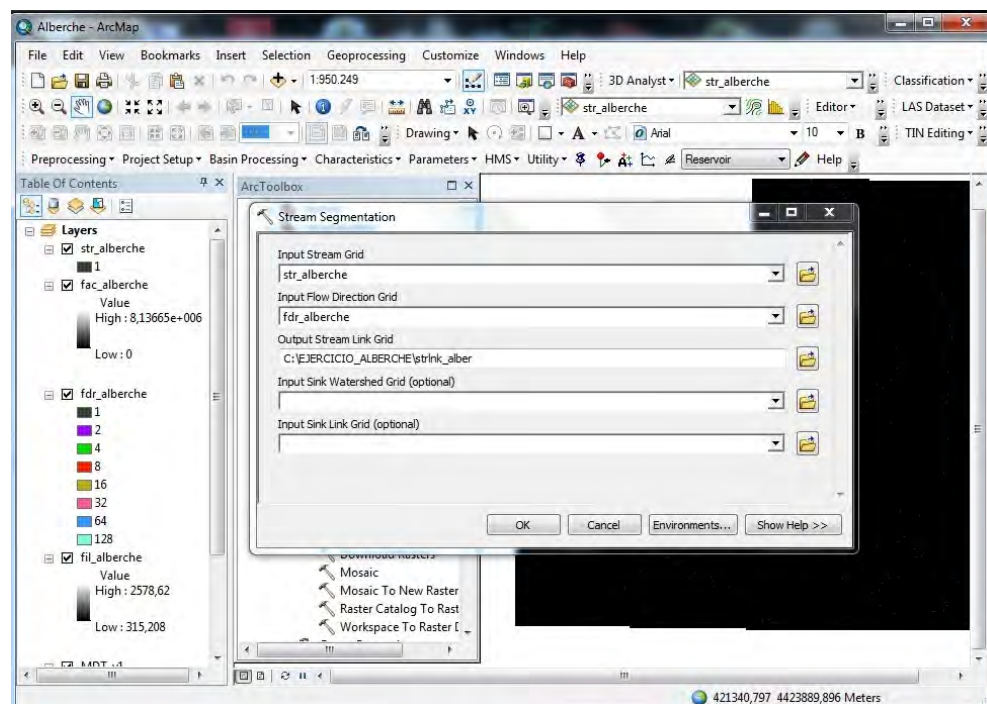


En *Input Flow Accumulation Grid* seleccionamos *fac_alberche*.

En *Output Stream Grid* elegimos la carpeta de trabajo y el nombre del archivo (*Str_Alberche*).

Paso 7. División de los tramos en segmentos

Preprocessing → Stream Segmentation



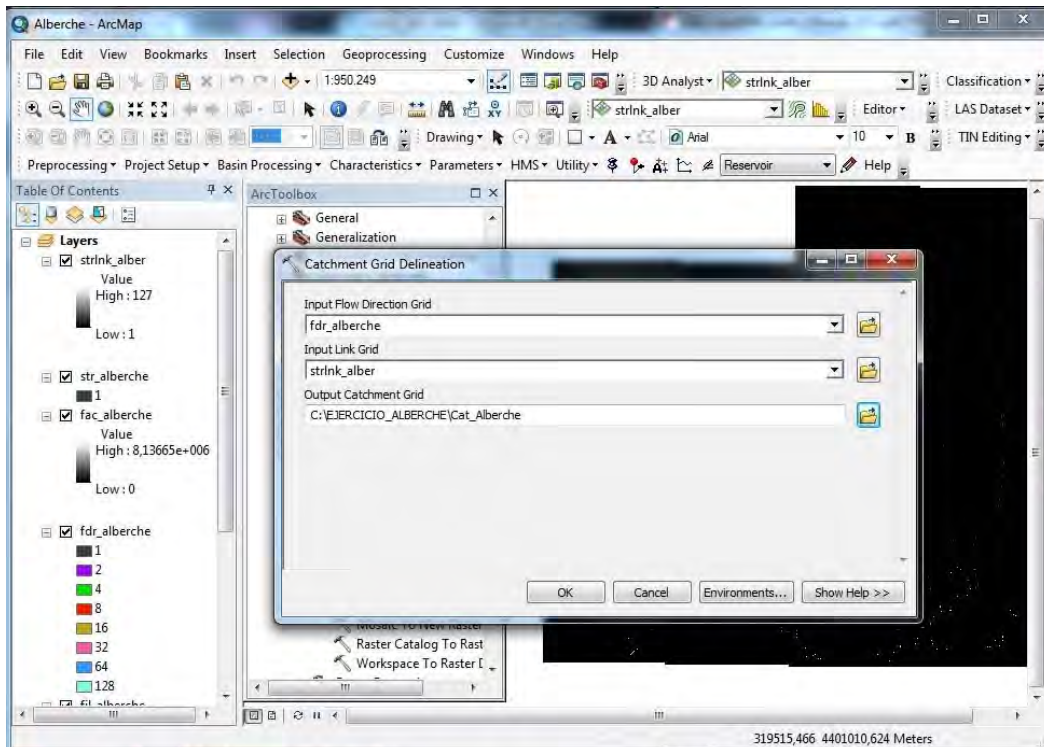
En *Input Stream Grid* seleccionamos str_alberche.

En *Input Flow Direction Grid* seleccionamos fdr_alberche.

En *Output Stream Link Grid* elegimos la carpeta de trabajo y el nombre del archivo (strlnk_alber).

Paso 8. Definición de la cuenca de cada tramo

Preprocessing → Catchment Grid Delineation



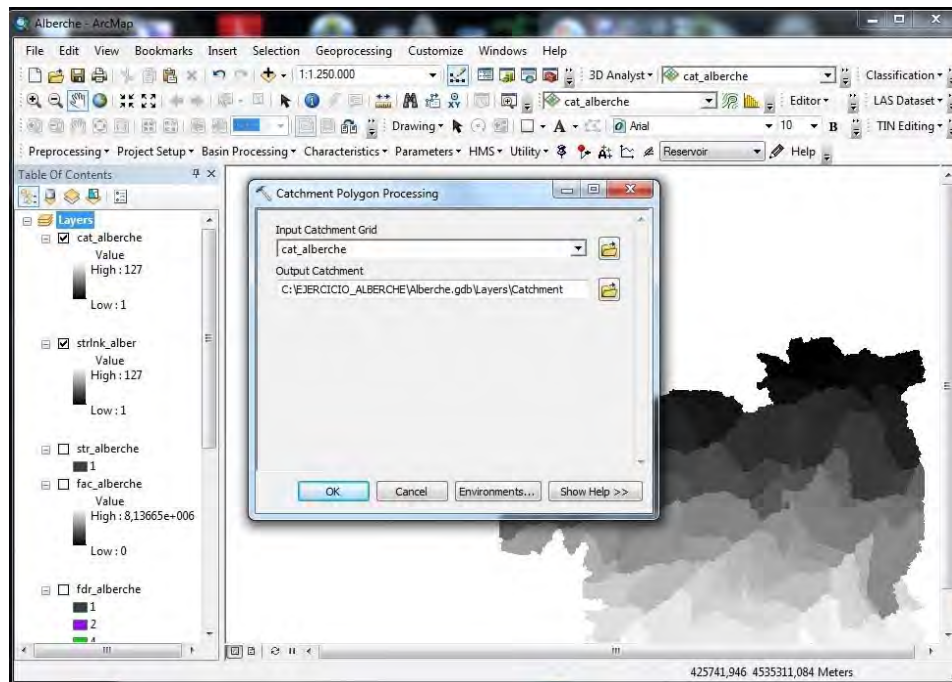
En *Input Flow Direction Grid* seleccionamos fdr_alberche.

En *Input Link Grid* seleccionamos strlnk_alber.

En *Output Catchment Grid* elegimos la carpeta de trabajo y el nombre del archivo (Cat_Alberche).

Paso 9. Definición de los polígonos de cada cuenca

Preprocessing → Catchment Polygon Processing

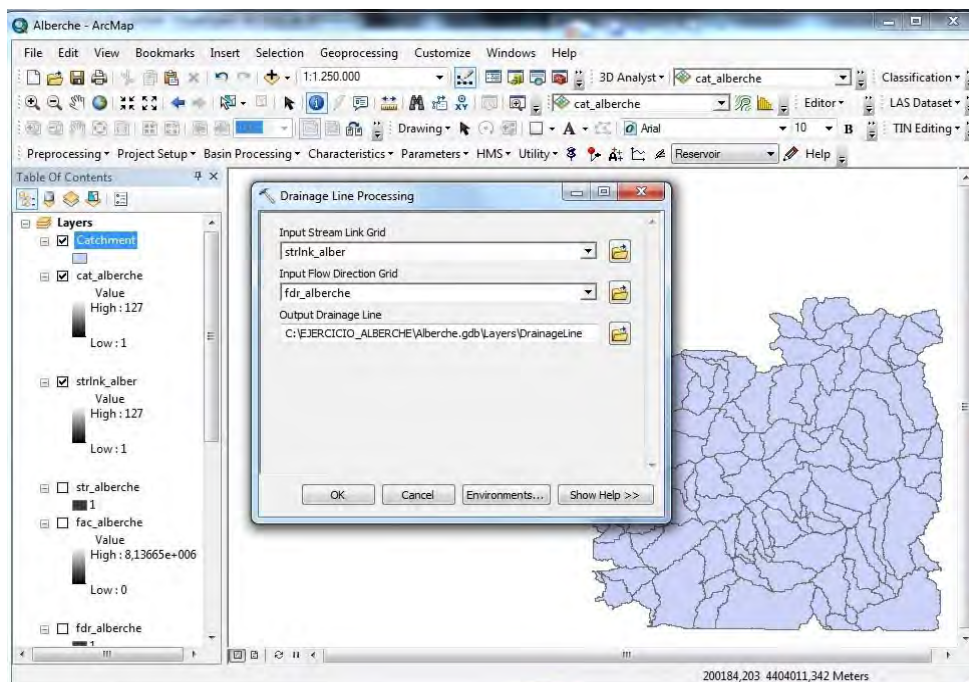


En *Input Catchment Grid* seleccionamos cat_alberche.

En *Output Catchment* elegimos la carpeta de trabajo y el nombre del archivo (Catchment).
Nótese que se ha creado la carpeta ALBERCHE.GDB.

Paso 10. Definición de las líneas de drenaje

Preprocessing → Drainage Line Processing



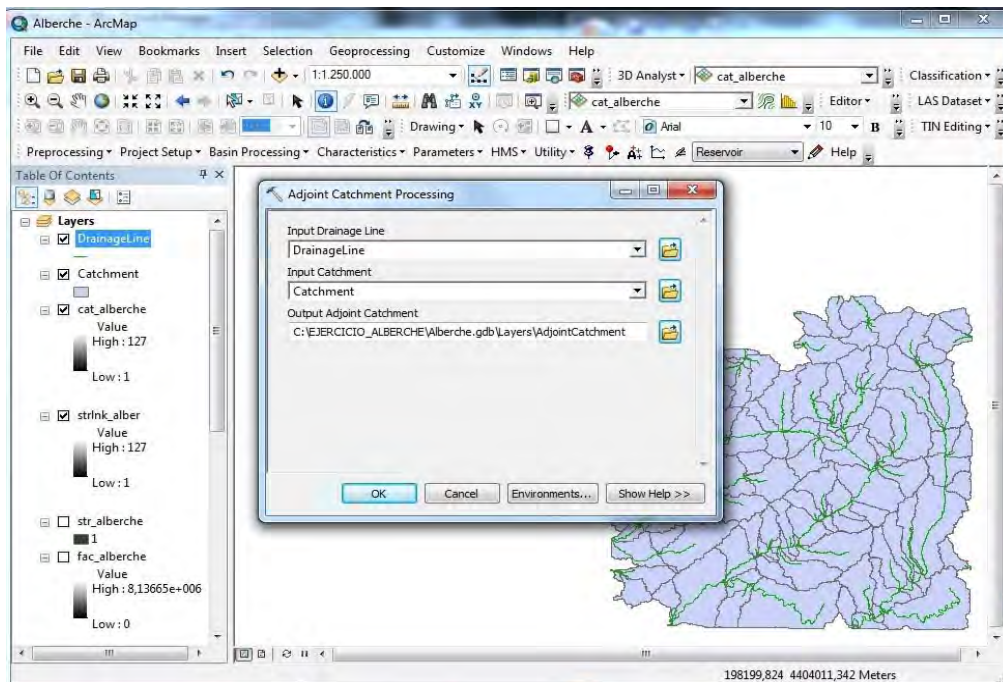
En *Input Stream Link Grid* seleccionamos strlnk_alber.

En *Input Flow Direction Grid* seleccionamos fdr_alberche.

En *Output Drainage Line* elegimos la carpeta de trabajo y el nombre del archivo (DrainageLine).

Paso 11. Unión de subcuencas

Preprocessing → Adjoint Catchment Processing



En *Input Drainage Line* seleccionamos DrainageLine.

En *Input Catchment* seleccionamos Catchment.

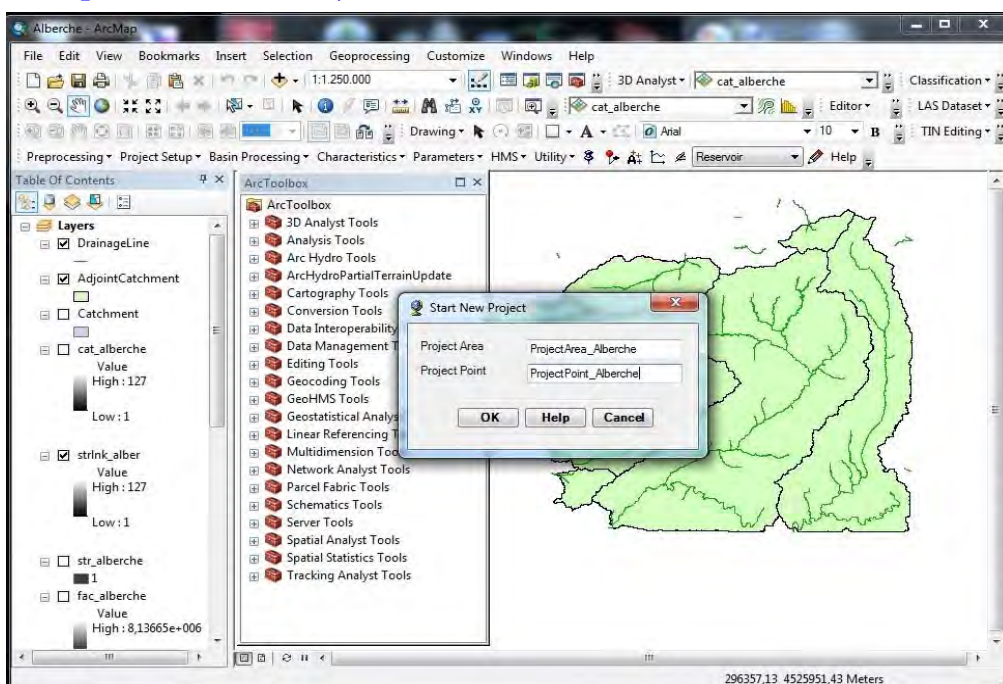
En *Output Adjoint Catchment* elegimos la carpeta de trabajo y el nombre del archivo (AdjointCatchment).

6.2.2. Delimitación definitiva de la cuenca y las subcuencas

Paso 1. Creación de un proyecto nuevo

En el menú de HEC-GeoHMS pinchamos en *Project Setup*.

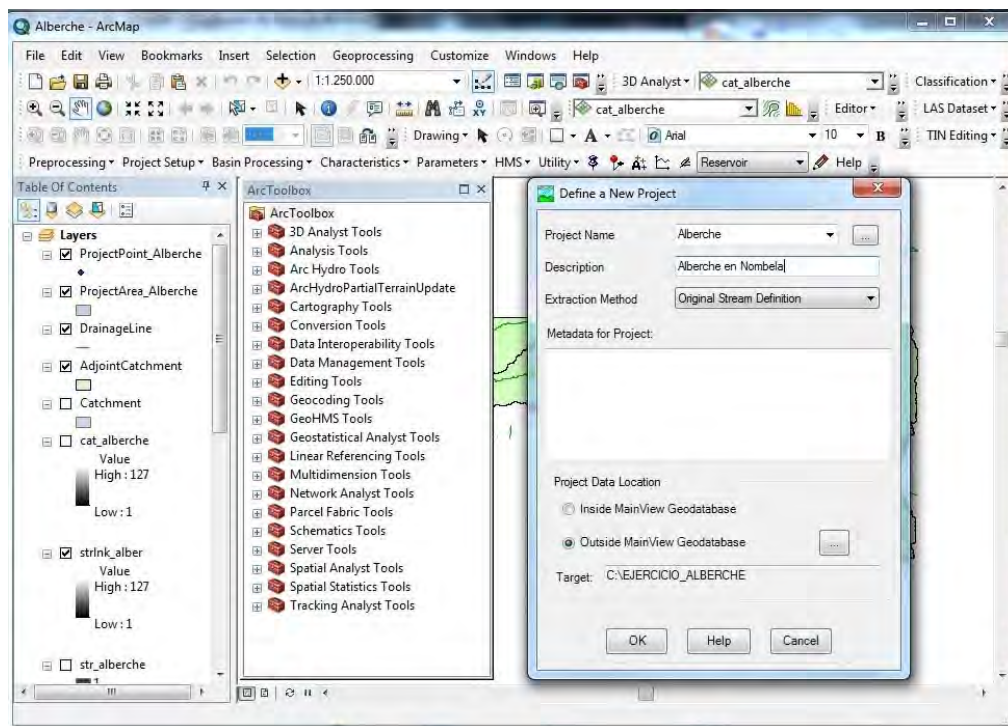
Project Setup → Start New Project



En *Project Area* damos el nombre a la cuenca (ProjectArea_Alberche).

En *Project Point* damos el nombre del punto de cierre de la cuenca (ProjectPoint_Alberche).

Al aceptar aparece el siguiente cuadro:




En *Project Name* damos el nombre del proyecto (Alberche).

En *Description* escribimos una pequeña descripción del proyecto.

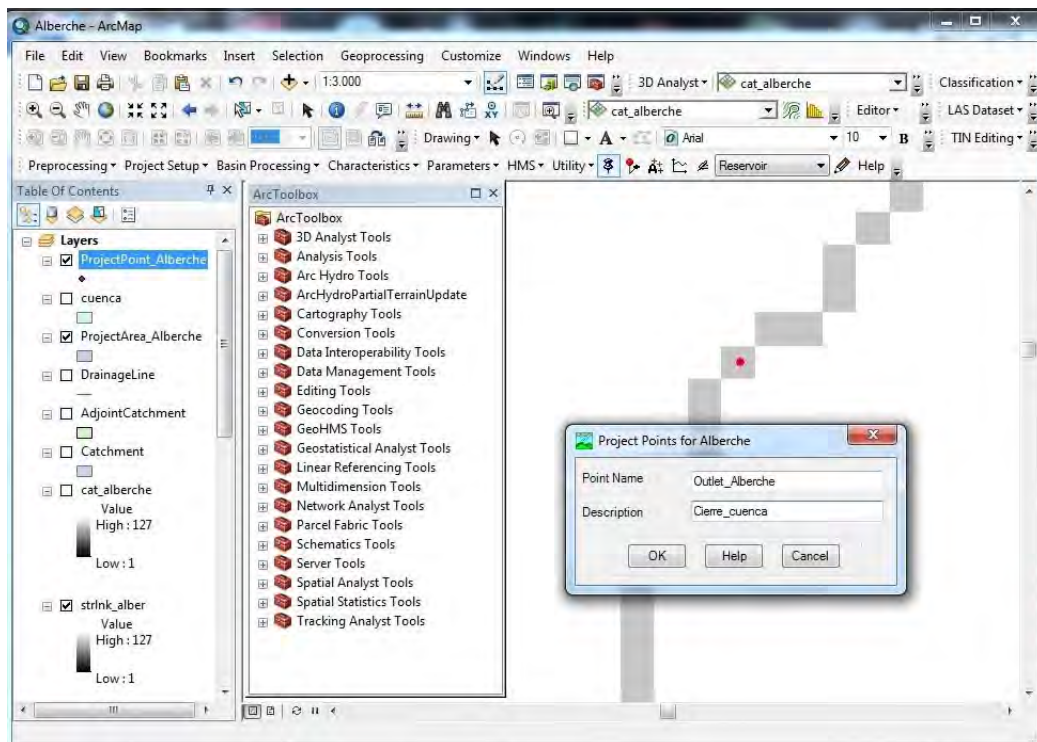
En *Extraction Method* seleccionamos *Original Stream Definition*.

En *Project Data Location* seleccionamos *Outside MainView Geodatabase* y definimos la carpeta de trabajo (EJERCICIO_ALBERCHE).

Paso 2. Definición del punto de cierre de la cuenca

En el menú de HEC-GeoHMS pinchamos en *Add Project Point* .

Hacemos zoom hasta localizar el punto de cierre de la cuenca y pinchamos sobre él.

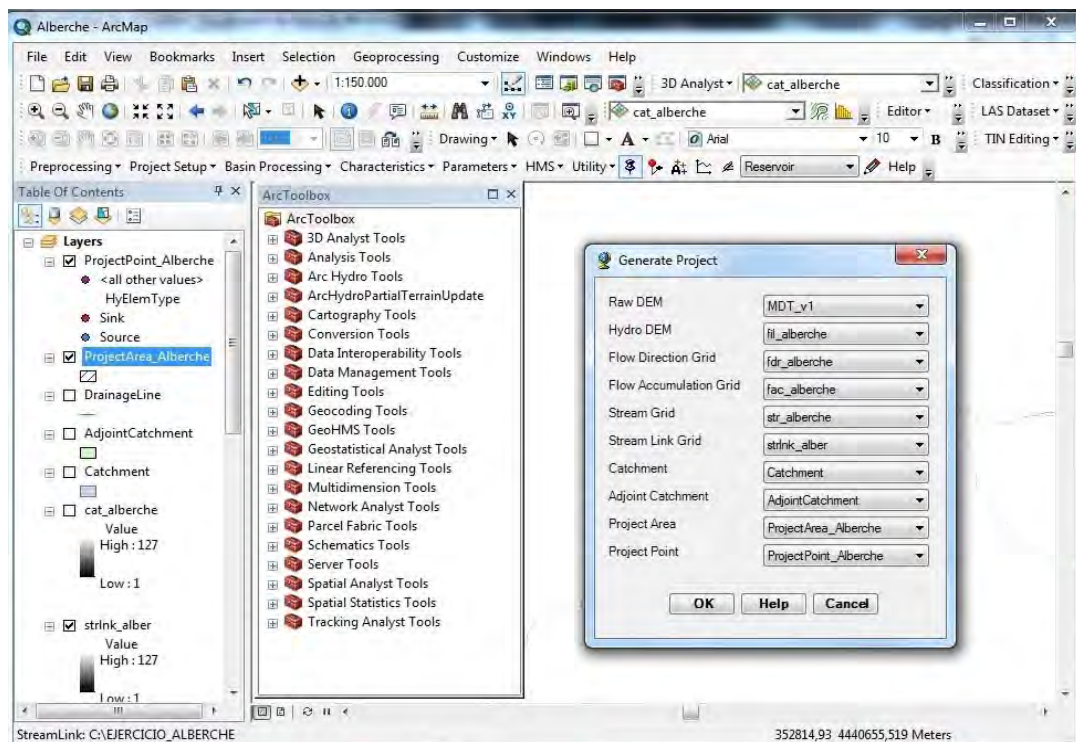


En *Point Name* escribimos el nombre del punto (Outlet_Alberche).

En *Description* escribimos una pequeña descripción del punto de cierre.

Paso 3. Definición del nuevo proyecto

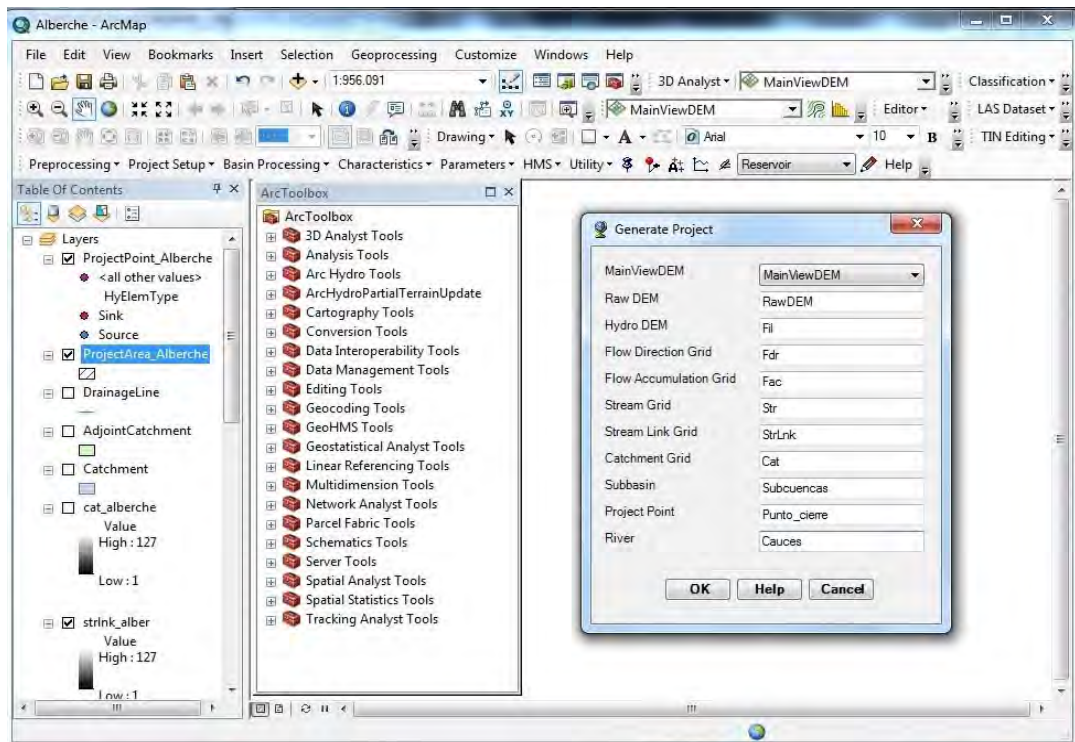
Project Setup → *Generate Project*



Seleccionamos todos los archivos que hemos creado en los pasos anteriores:

- *Raw DEM*: MDT_v1.
- *Hydro DEM*: fil_alberche.
- *Flow Direction Grid*: fdr_alberche.
- *Flow Accumulation Grid*: fac_alberche.
- *Stream Grid*: str_alberche.
- *Stream Link Grid*: strlnk_alber.
- *Catchment*: Catchment.
- *Adjoint Catchment*: AdjointCatchment.
- *Project Area*: ProjectArea_Alberche.
- *Project Point*: ProjectPoint_Alberche.

Al aceptar aparece otro cuadro donde debemos dar nombre a las capas de GIS:

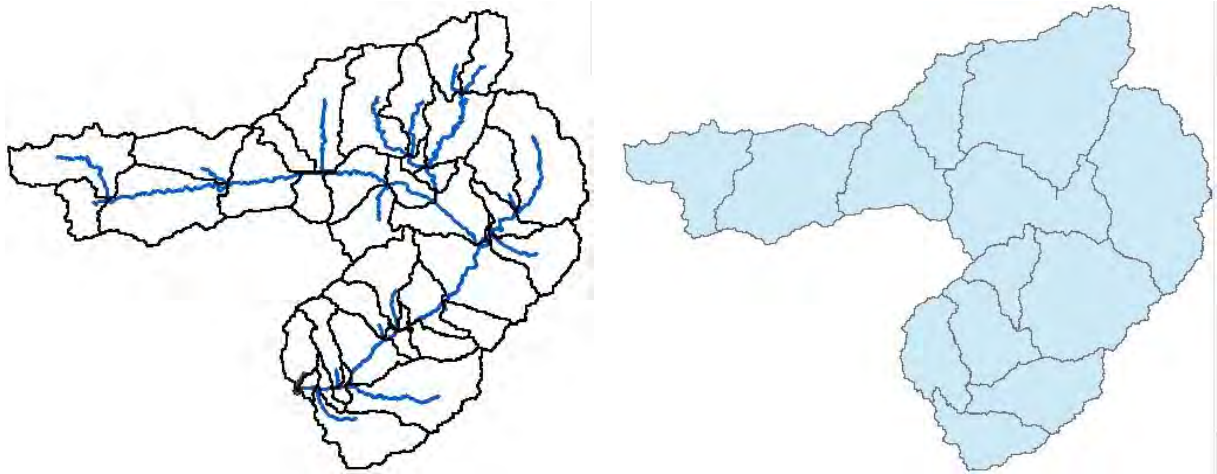



Damos los siguientes nombres:

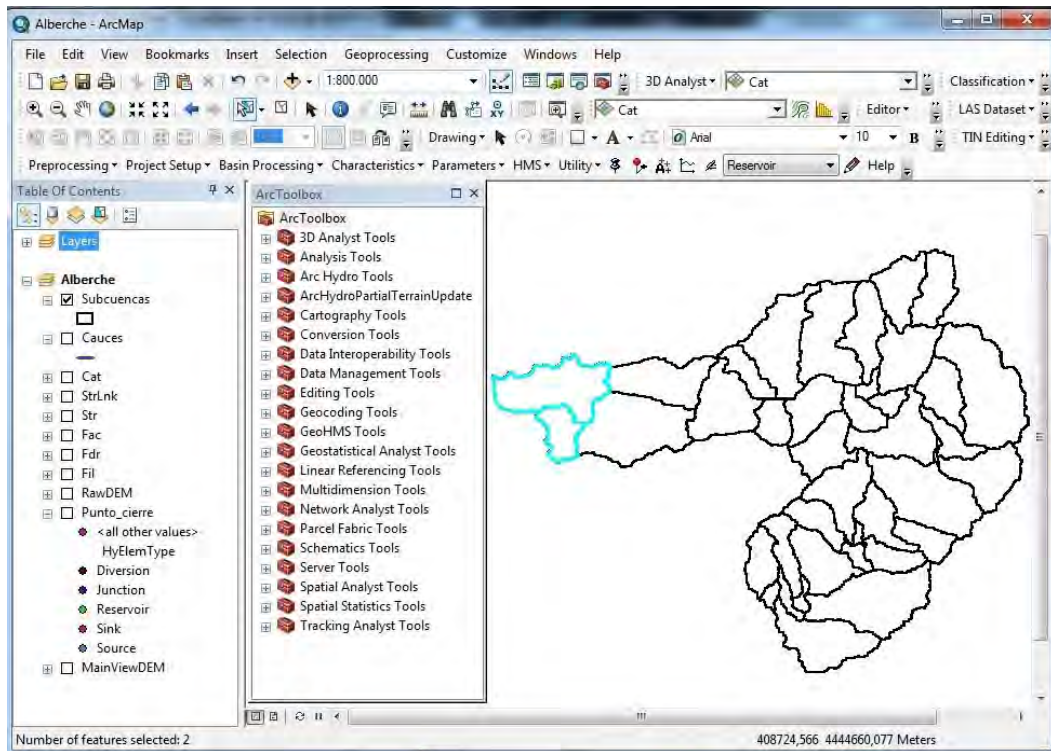
- *MainViewDEM*: MainViewDEM.
- *Raw DEM*: RawDEM.
- *Hydro DEM*: Fil.
- *Flow Direction Grid*: Fdr.
- *Flow Accumulation Grid*: Fac.
- *Stream Grid*: Str.
- *Stream Link Grid*: StrLnk.
- *Catchment Grid*: Cat.
- *Subbasin*: Subcuencas.
- *Project Point*: Punto_cierre.
- *River*: Cauces.

Paso 4. Unión de subcuencas

Si el programa genera un número elevado de subcuencas, podemos unificar varias en una sola. En este ejemplo vamos a dejar 13 subcuencas. La imagen de la izquierda muestra las cuencas que ha generado el programa y la imagen de la derecha, las 13 subcuencas que hemos dejado tras este proceso.

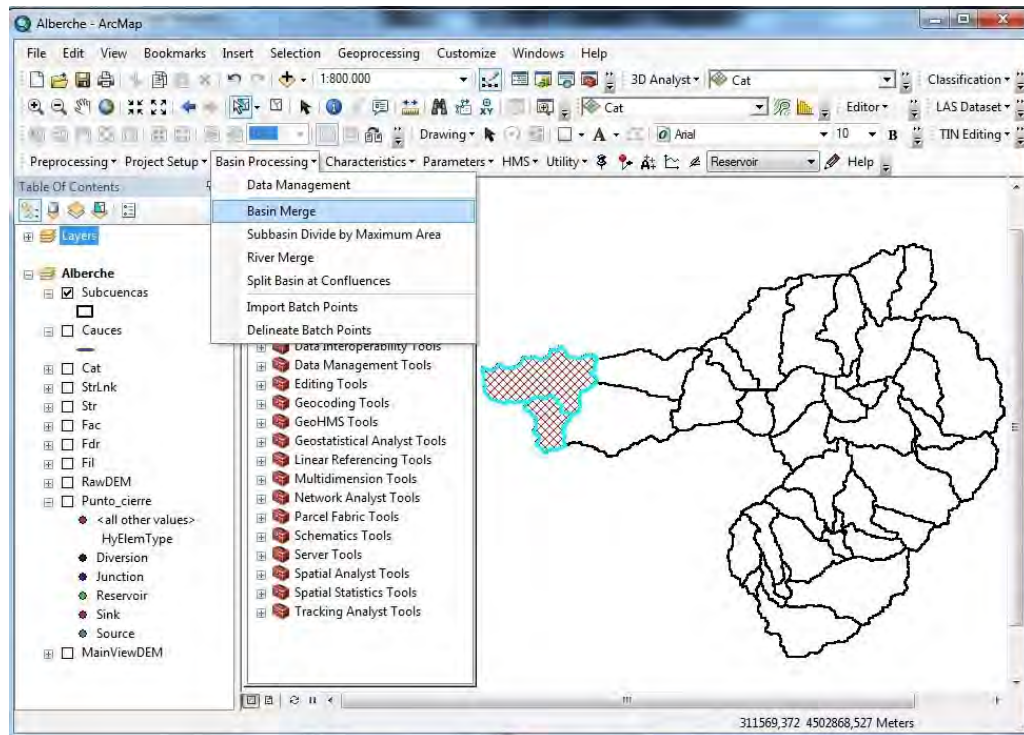


Seleccionamos las subcuencas a unir con la herramienta *Select Features* 



Y en el menú de Hec-GeoHMS pinchamos en *Basin Processing*.

Basin Processing → Basin Merge

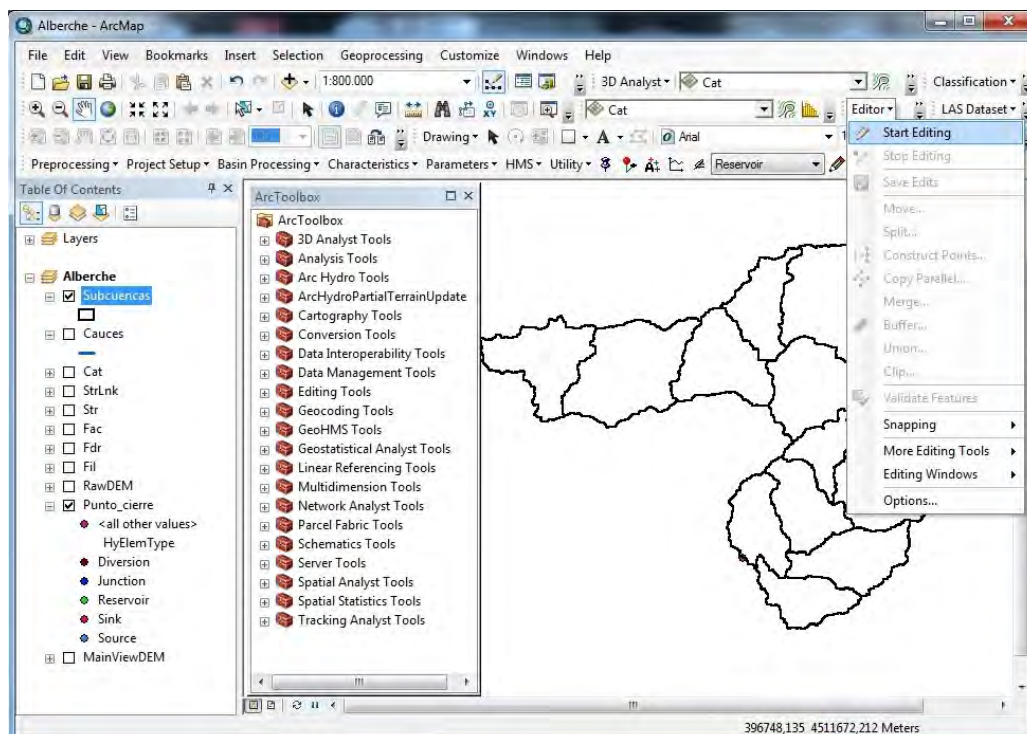


Repetir el mismo proceso con todas las subcuencas con cuidado, ya que algunas son muy pequeñas y difíciles de apreciar. En este caso, es más sencillo identificar estas pequeñas cuencas en la tabla de atributos de la capa que gráficamente.

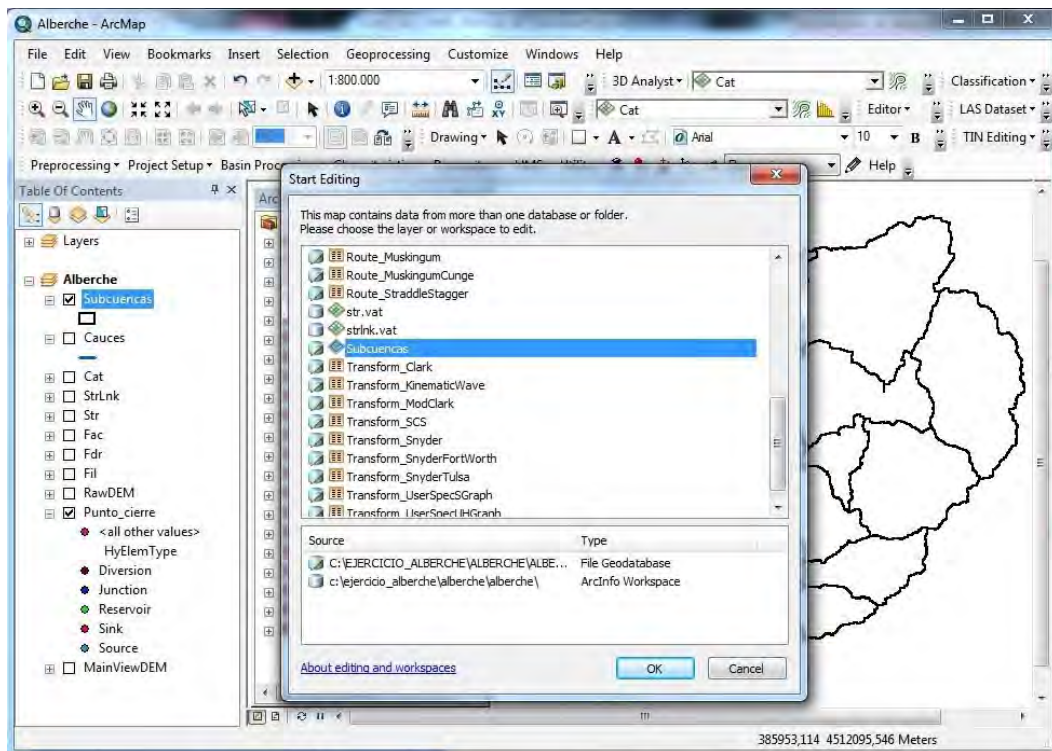
Paso 5. Cambio de nombre de las subcuencas

Para facilitar la identificación de las subcuencas vamos a modificar sus nombres.

Editor → Start Editing

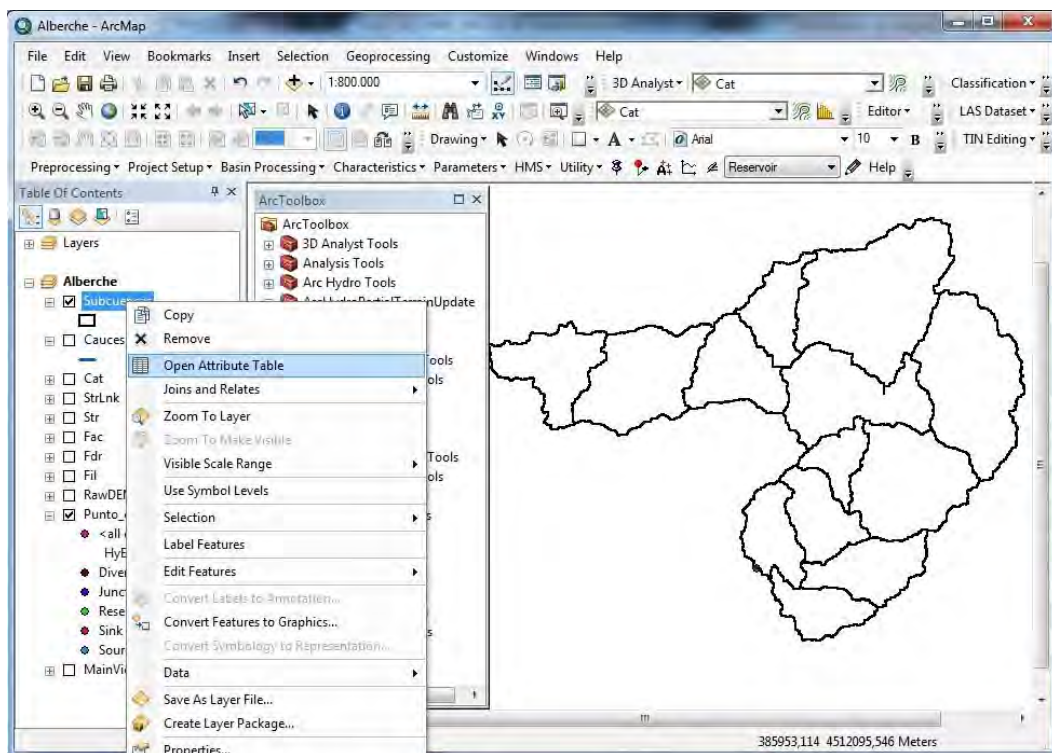


Seleccionamos la capa Subcuencas.

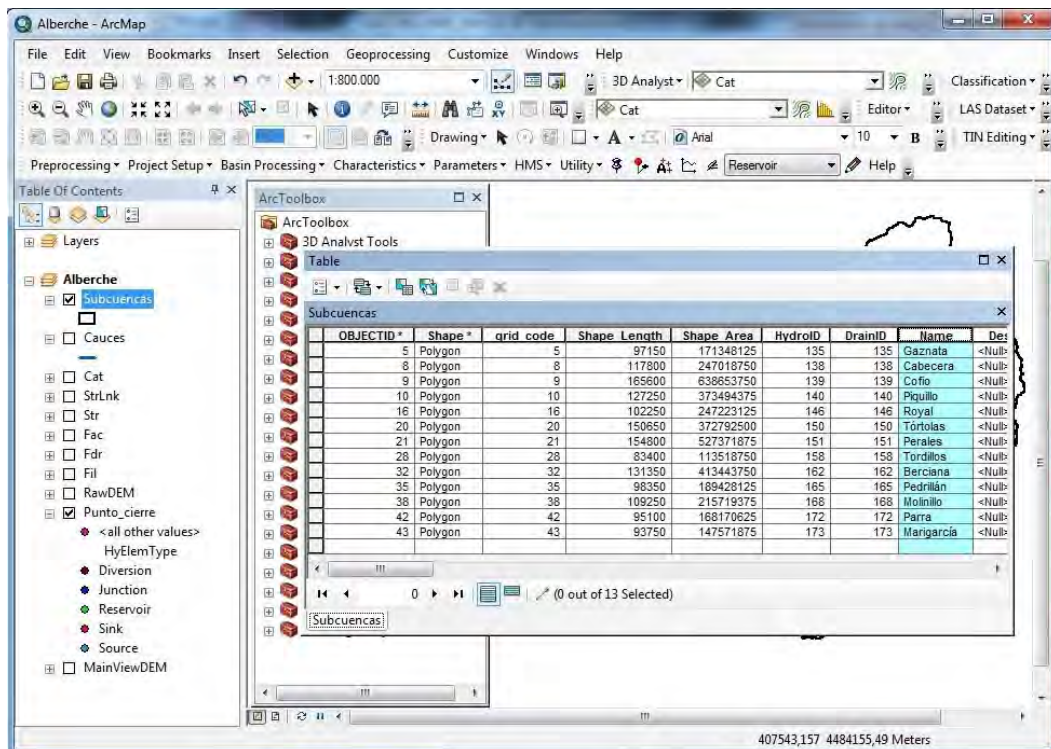
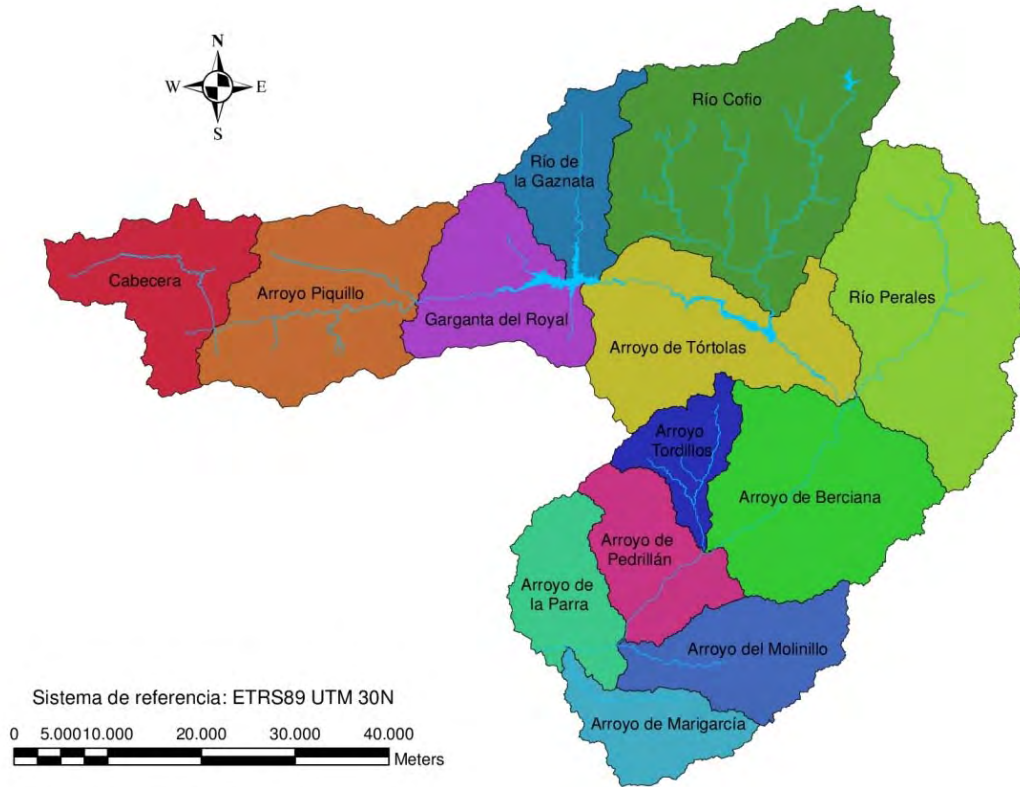


Abrimos la tabla de atributos de la capa Subcuencas.

Open Attribute Table

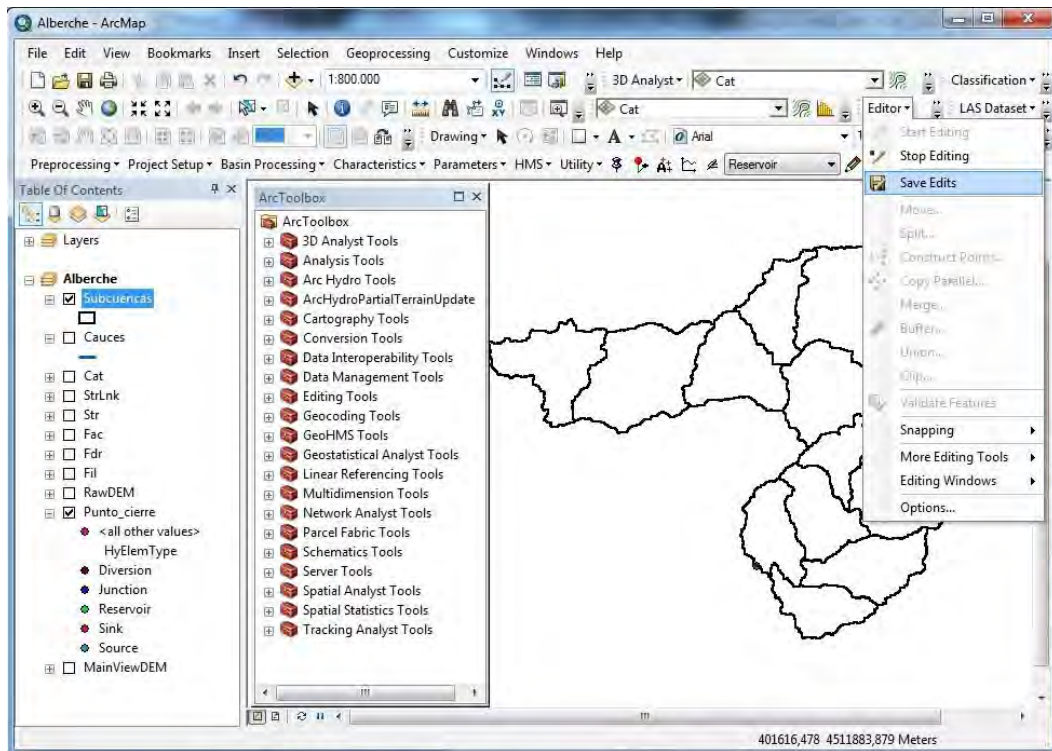


Modificamos los nombres de la columna *Name* según el siguiente mapa. Los nombres asignados coinciden con su cauce más importante.



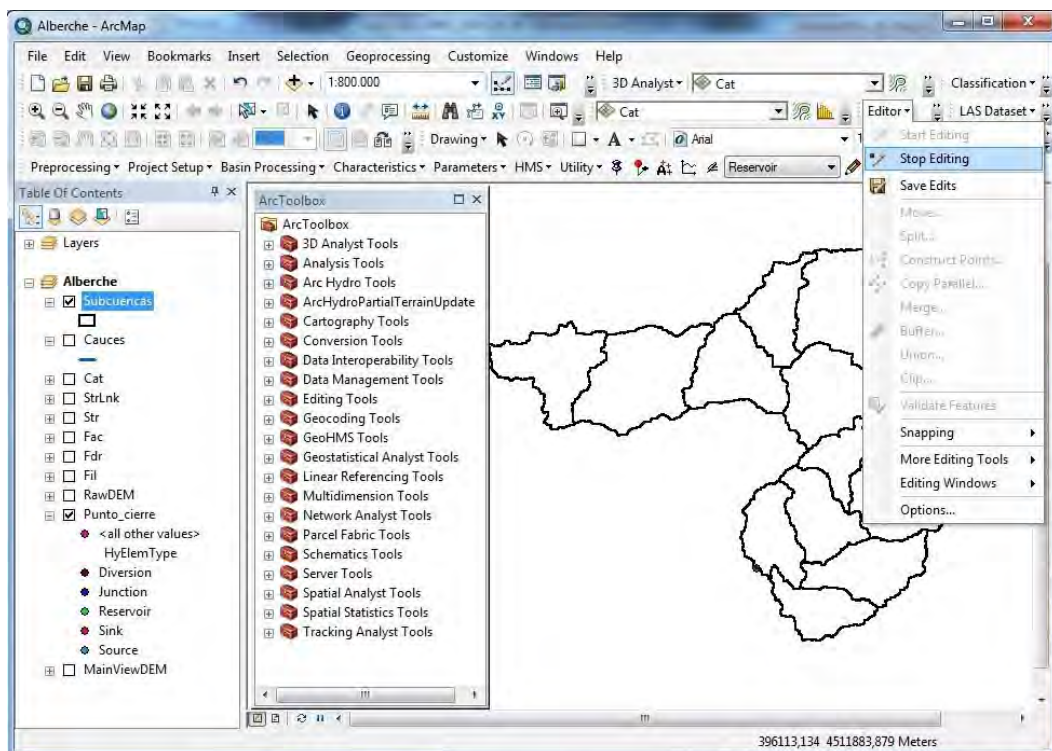
Finalmente guardamos los cambios:

Editor → Save Edits



Y cerramos la edición.

Editor → Stop Editing



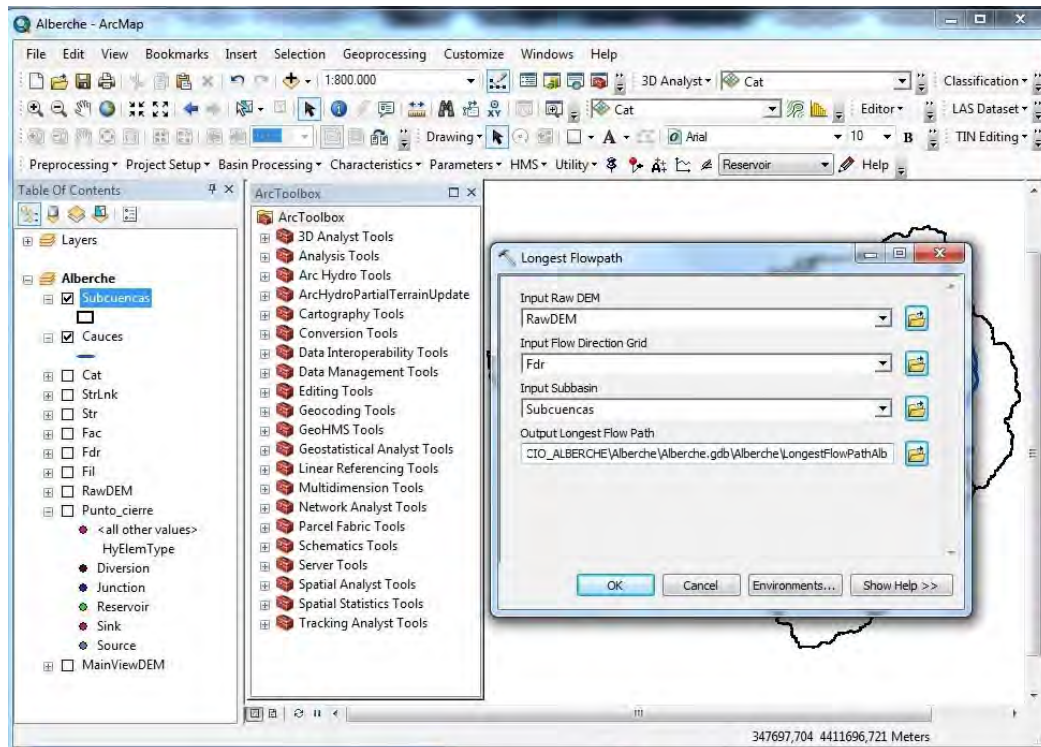
6.2.3. Definición de las características físicas de la cuenca y las subcuencas

Paso 1. Cálculo de la longitud del cauce más largo de las subcuencas

Este proceso nos servirá para determinar el tiempo de concentración posteriormente.

En el menú de Hec-GeoHMS pinchamos en *Characteristics*.

Characteristics* → *Longest Flow Path



En *Input Raw DEM* seleccionamos RawDEM.

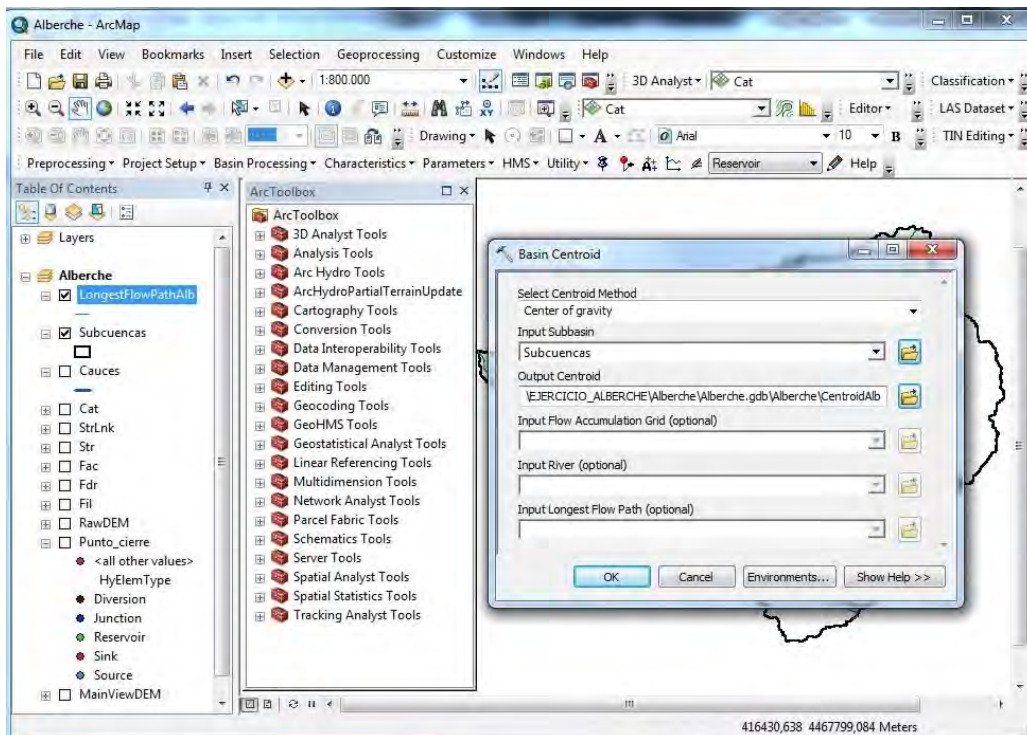
En *Input Flow Direction Grid* seleccionamos Fdr.

En *Input Subbasin* seleccionamos Subcuencas.

En *Output Longest Flow Path* damos el nombre al archivo (LongestFlowPathAlb).

Paso 2. Cálculo del centroide de cada subcuenca

Characteristics → Basin Centroid



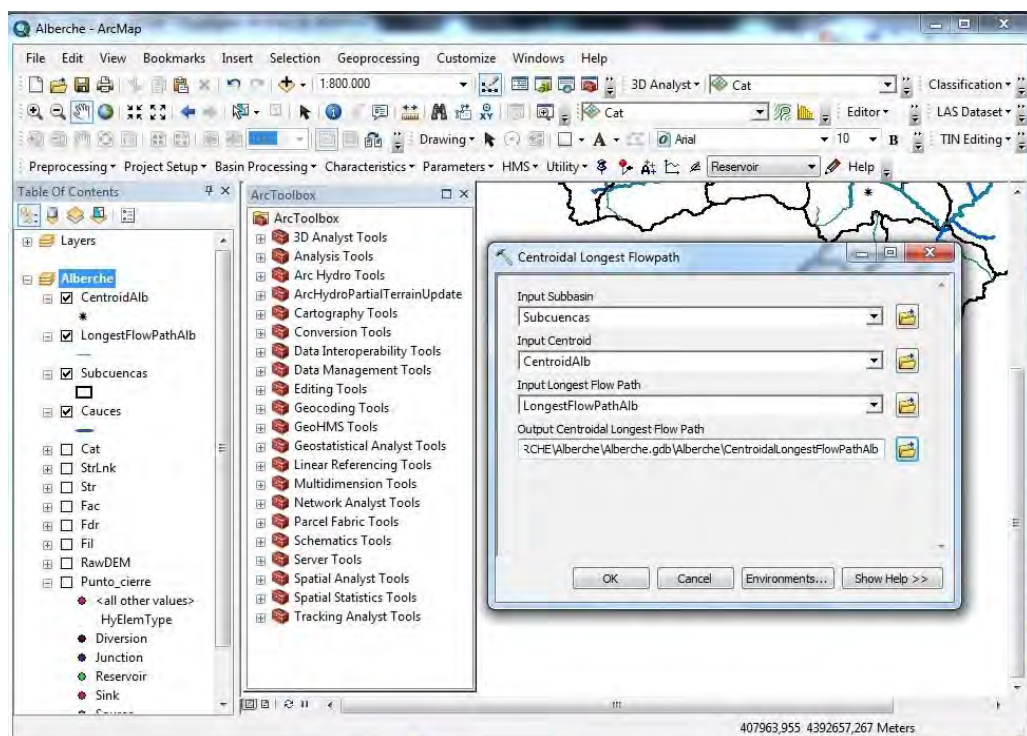
En *Select Centroid Method* seleccionamos *Center of gravity*.

En *Input Subbasin* seleccionamos *Subcuencas*.

En *Output Centroid* damos el nombre al archivo (*CentroidAlb*).

Paso 3. Cálculo del centroide del cauce más largo

Characteristics → Centroidal Longest Flowpath



En *Input Subbasin* seleccionamos Subcuencas.

En *Input Centroid* seleccionamos CentroidAlb.

En *Input Longest Flow Path* seleccionamos LongestFlowPathAlb.

En *Output Centroidal Longest Flow Path* damos el nombre al archivo (CentroidalLongestFlowPathAlb).

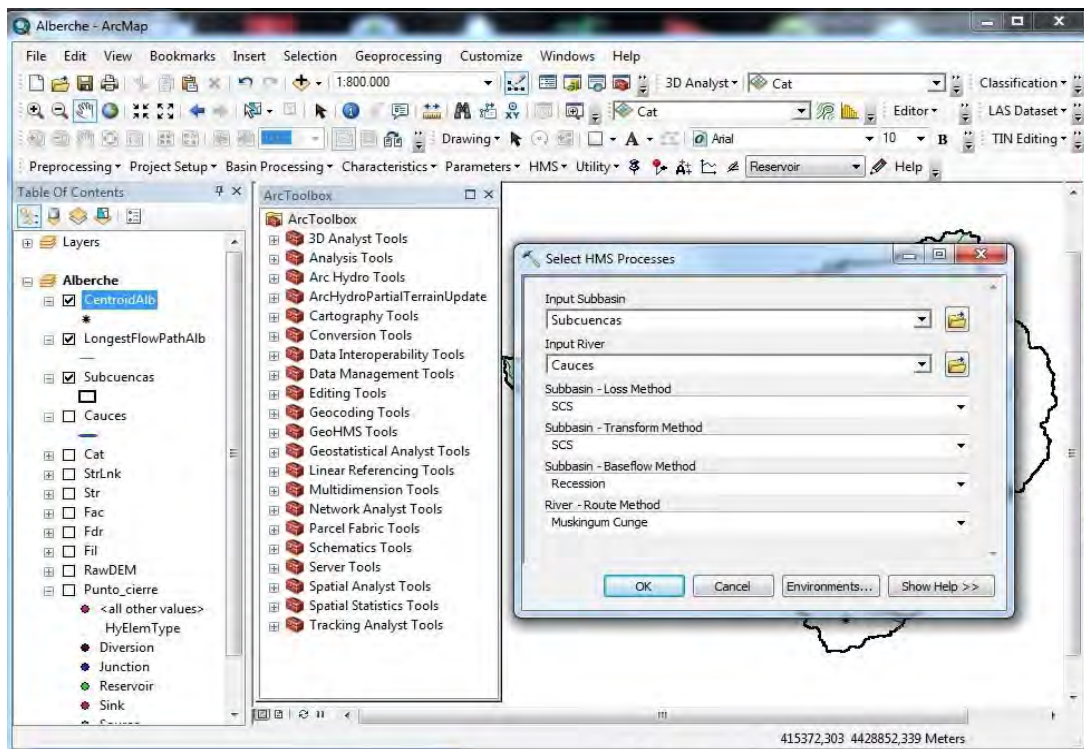
Se pueden realizar otros procesos con las subcuencas y los tramos de cauces, como dividir cuencas, sacar perfiles de los cauces, calcular longitudes de cauces principales, etc, pero en este ejemplo sólo se han visto las herramientas que nos generarán los datos necesarios para las siguientes fases.

6.2.4. Definición de los parámetros hidrológicos

Paso 1. Definición de los procesos de cálculo de HEC-HMS

En el menú de Hec-GeoHMS pinchamos en *Parameters*.

Parameters* → *Select HMS Processes



En *Input Subbasin* seleccionamos Subcuencas.

En *Input River* seleccionamos Cauces.

En *Subbasin - Loss Method* seleccionamos SCS.

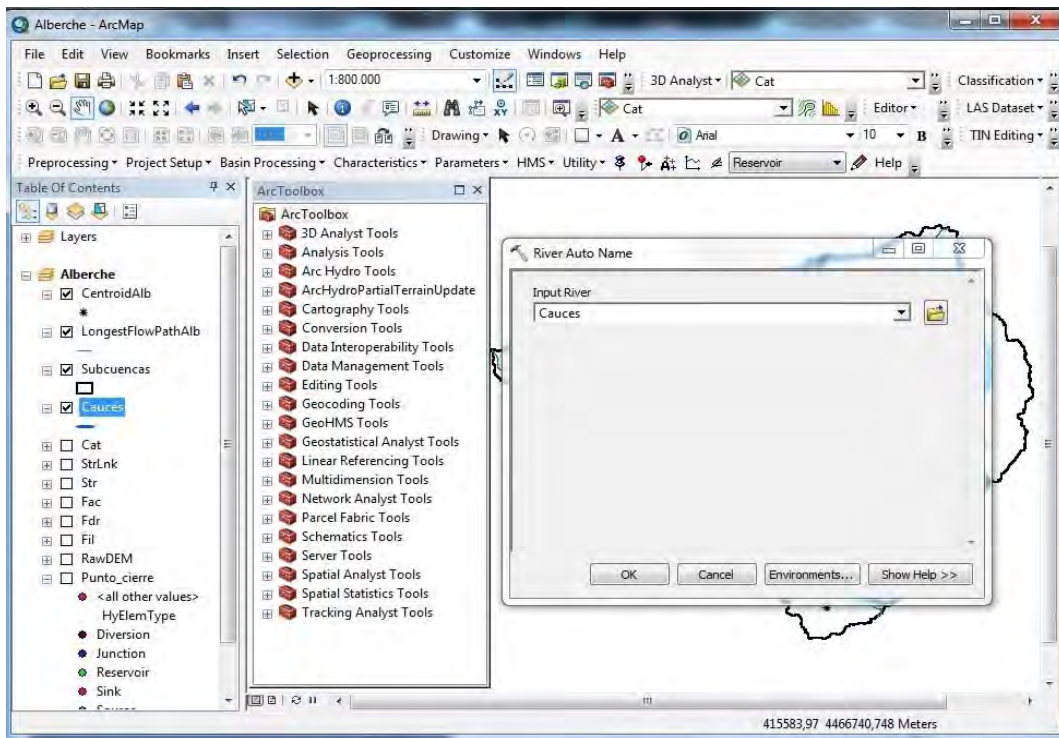
En *Subbasin - Transform Method* seleccionamos SCS.

En *Subbasin - Baseflow Method* seleccionamos Recession.

En *River - Route Method* seleccionamos Muskingum Cunge.

Paso 2. Asignación automática de nombre a los cauces

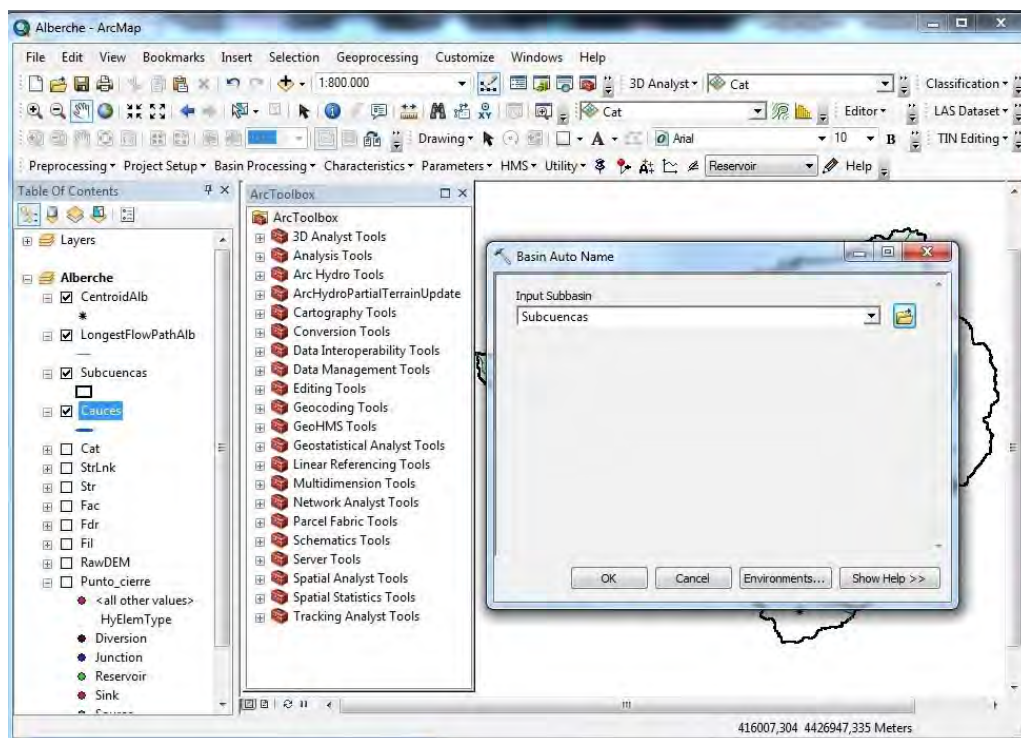
Parameters → *River Auto Name*



En *Input River* seleccionamos *Cauces*.

Paso 3. Asignación automática de nombre a las subcuencas

Parameters → *Basin Auto Name*



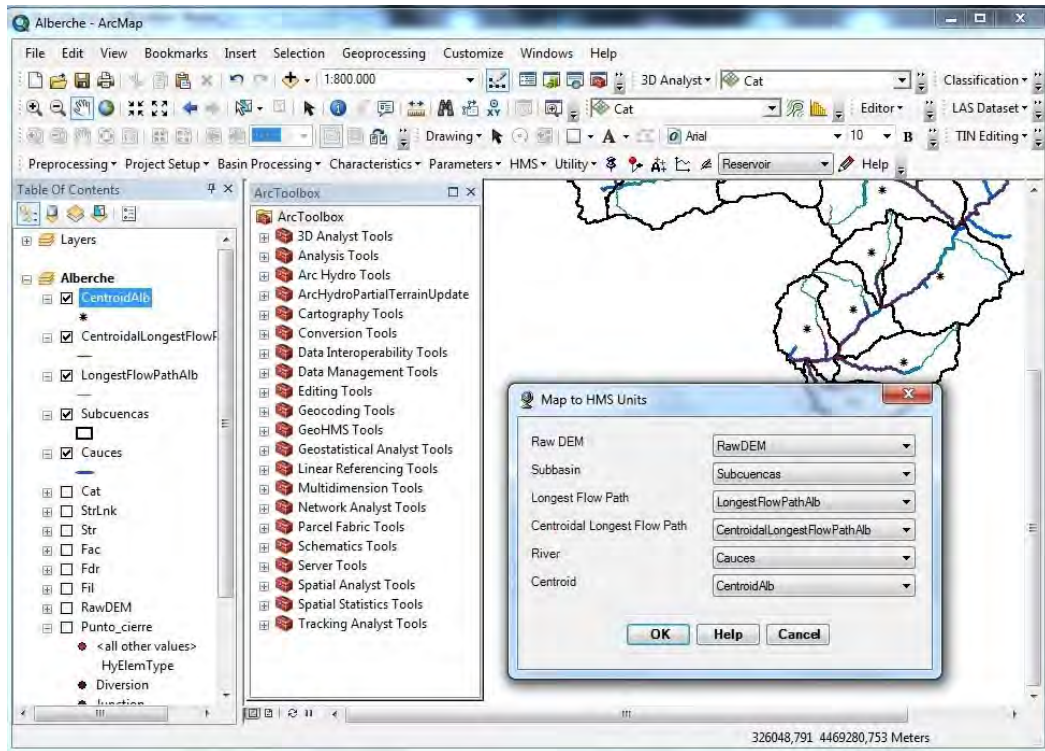
En *Input Subbasin* seleccionamos *Subcuencas*.

6.2.5. Definición de las entradas a HEC-HMS

Paso 1. Definición de los archivos de entrada y el sistema de unidades

En el menú de Hec-GeoHMS pinchamos en *HMS*.

HMS → *Map to HMS Units*



En *Raw DEM* seleccionamos RawDEM.

En *Subbasin* seleccionamos Subcuencas.

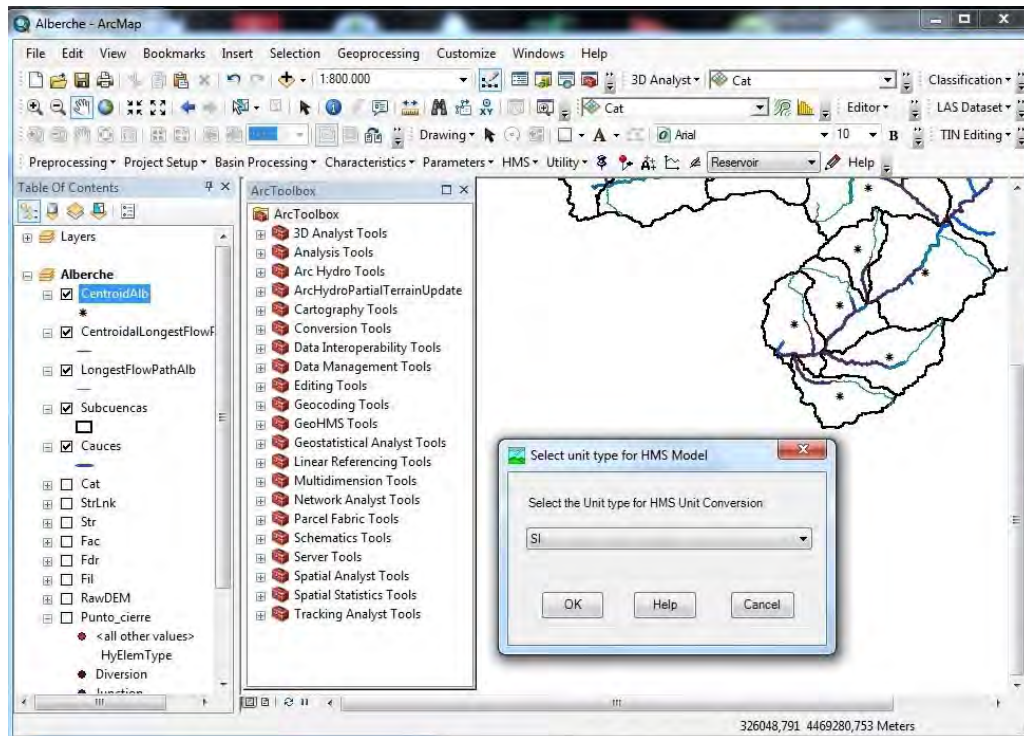
En *Longest Flow Path* seleccionamos LongestFlowPathAlb.

En *Centroidal Longest Flow Path* seleccionamos CentroidalLongestFlowPathAlb.

En *River* seleccionamos Cauces.

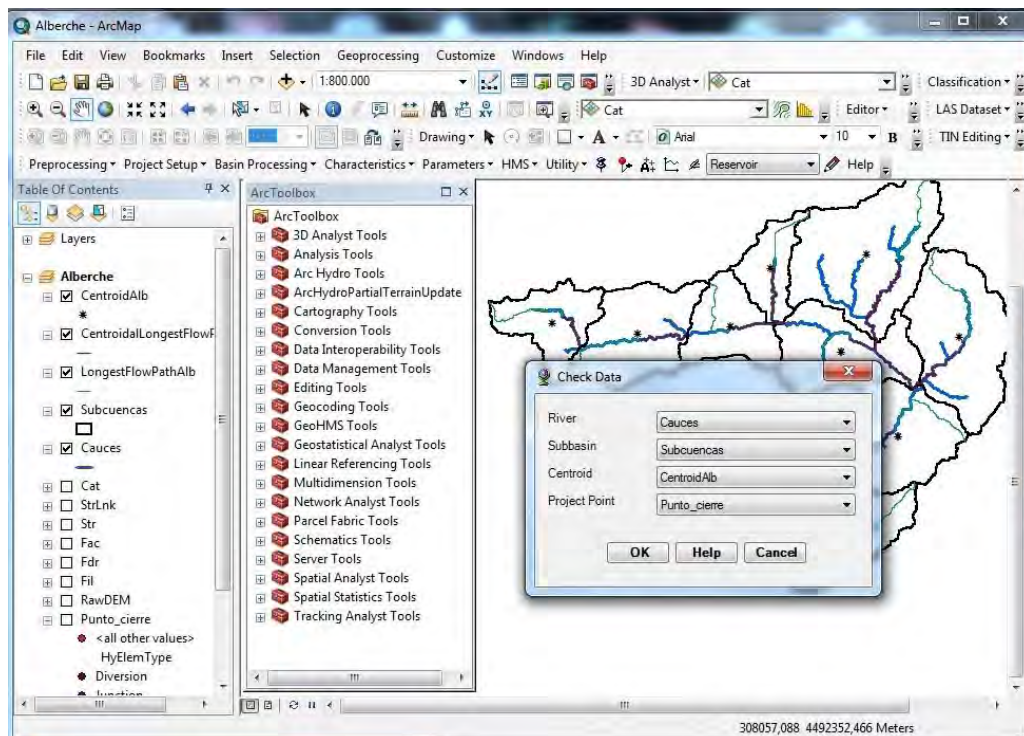
En *Centroid* seleccionamos CentroidAlb.

En el cuadro que aparece a continuación se selecciona el Sistema Internacional de unidades.



Paso 2. Comprobación de los datos para HMS

HMS → HMS Check Data



En *River* seleccionamos Cauces.

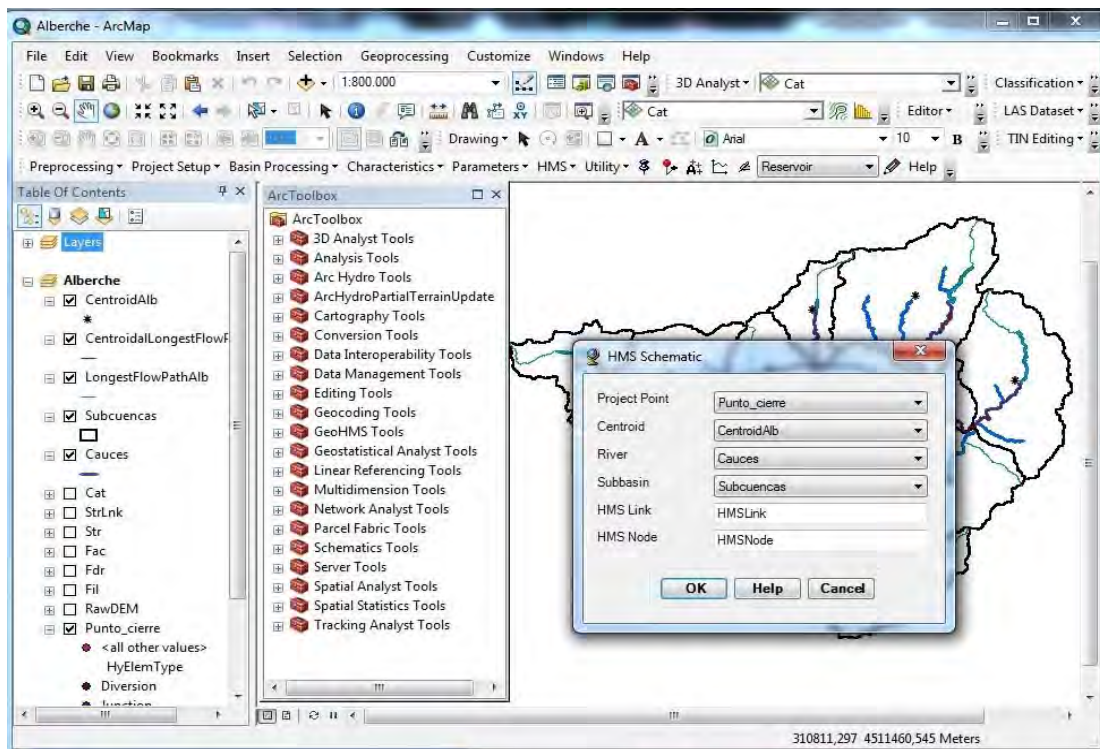
En *Subbasin* seleccionamos Subcuencas.

En *Centroid* seleccionamos CentroidAlb.

En *Project Point* seleccionamos Punto_cierre.

Paso 3. Definición del esquema de HMS

HMS → HMS Schematic



En *Project Point* seleccionamos Punto_cierre.

En *Centroid* seleccionamos CentroidAlb.

En *River* seleccionamos Cauces.

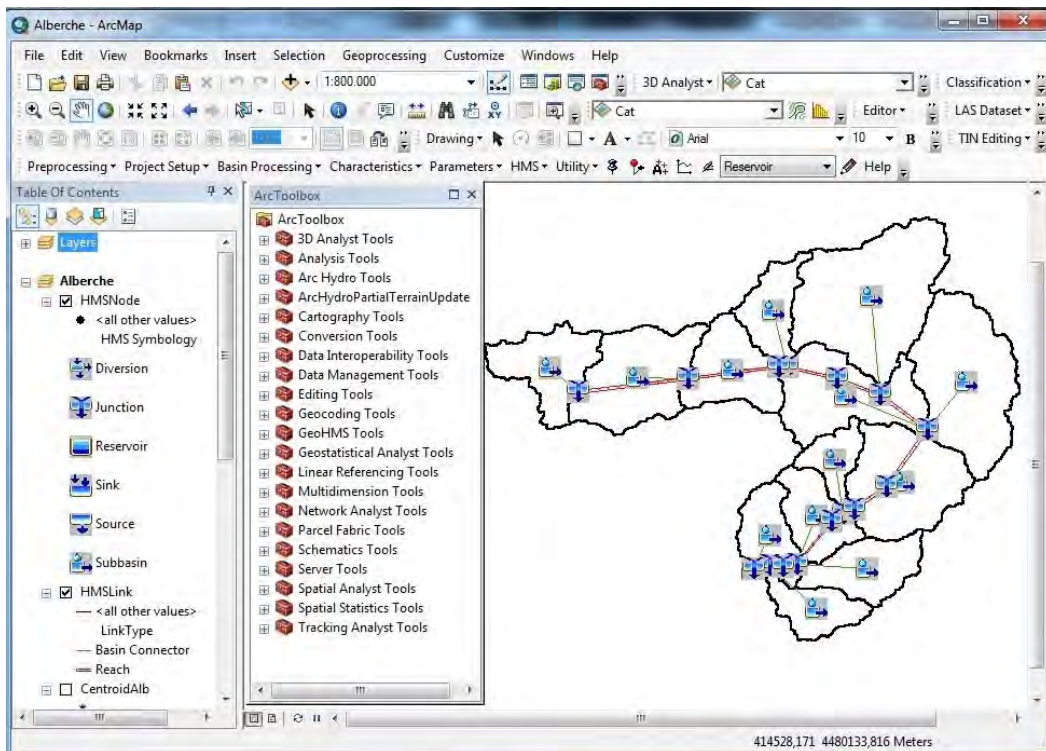
En *Subbasin* seleccionamos Subcuencas.

En *HMS Link* damos el nombre HMSLink.

En *HMS Node* damos el nombre HMSNode.

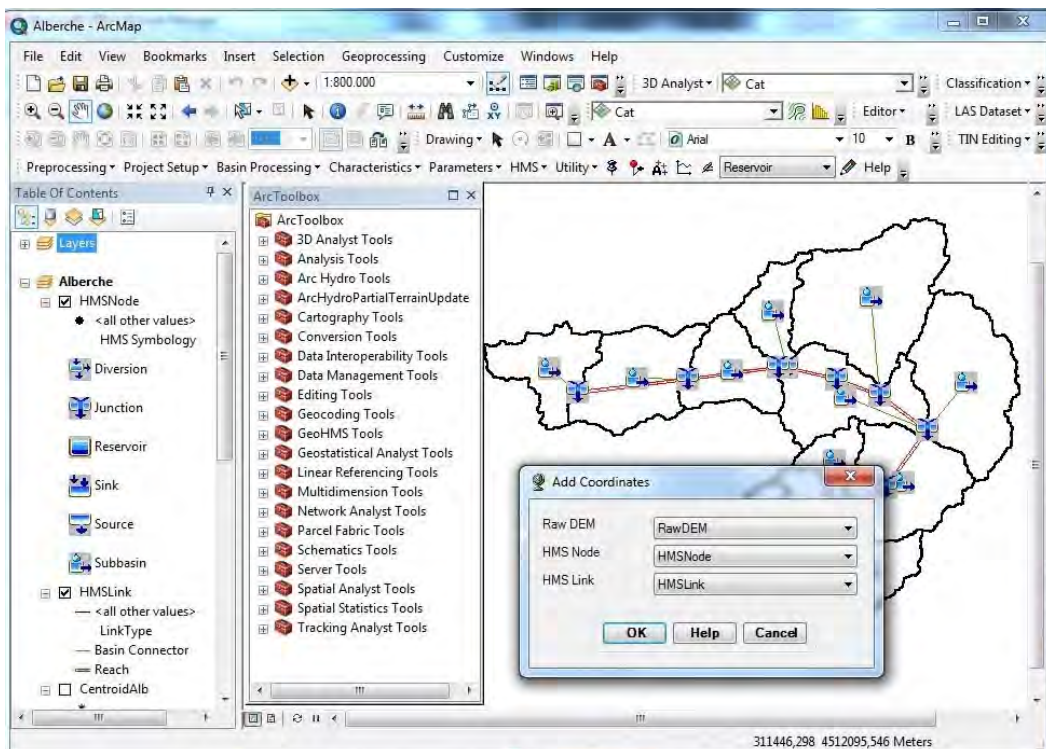
Paso 4. Definición de la leyenda HMS

HMS → Toggle HMS Legend → HMS Legend



Paso 5. Introducción de las coordenadas

HMS → Add Coordinates



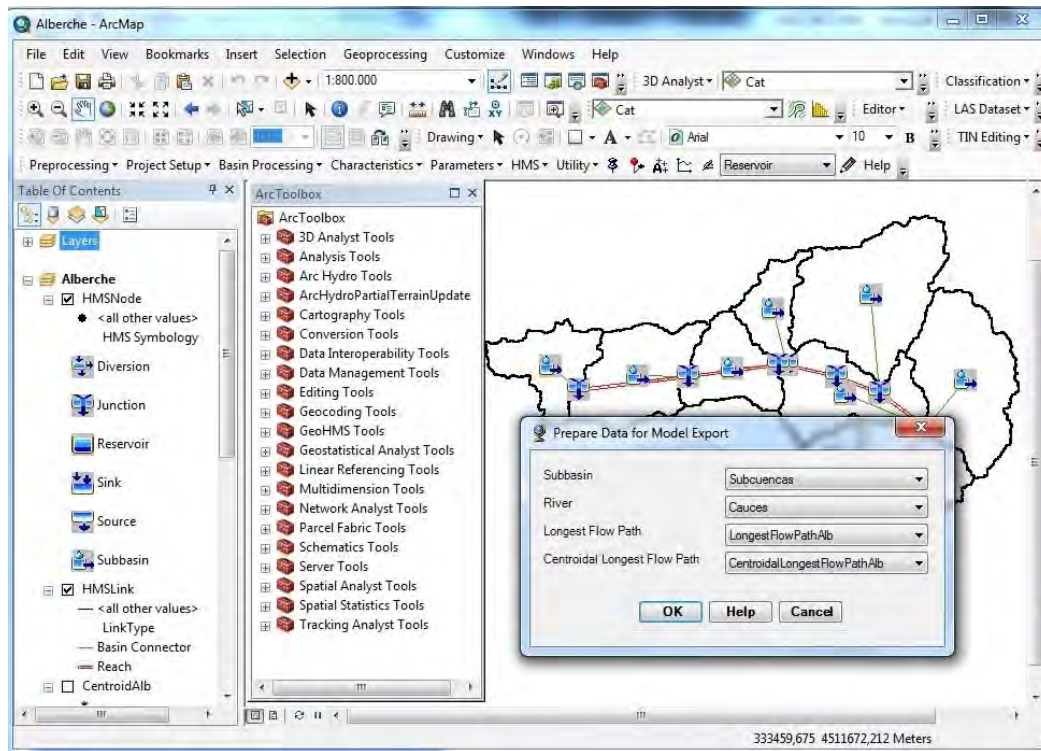
En Raw DEM seleccionamos RawDEM.

En *HMS Node* seleccionamos HMSNode.

En *HMS Link* seleccionamos HMSLink.

Paso 6. Preparación de los datos a exportar

HMS → Prepare Data for Model Export



En *Subbasin* seleccionamos Subcuencas.

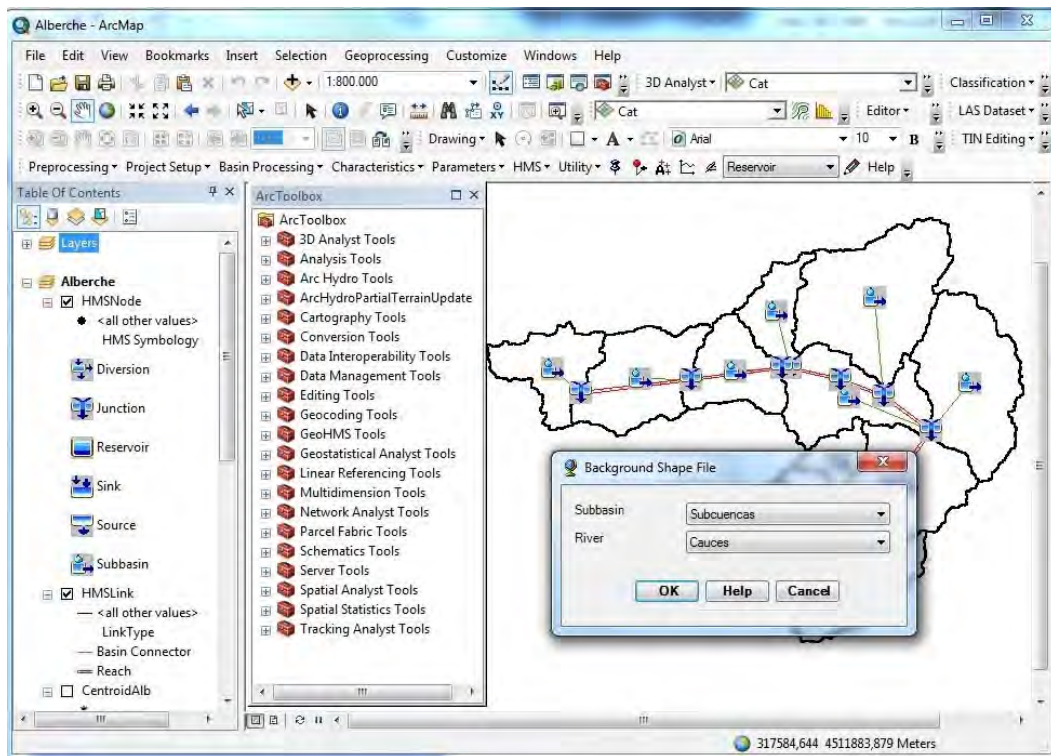
En *River* seleccionamos Cauces.

En *Longest Flow Path* seleccionamos LongestFlowPathAlb.

En *Centroidal Longest Flow Path* seleccionamos CentroidalLongestFlowPathAlb.

Paso 7. Definición de la imagen de fondo

HMS → Background Shape File

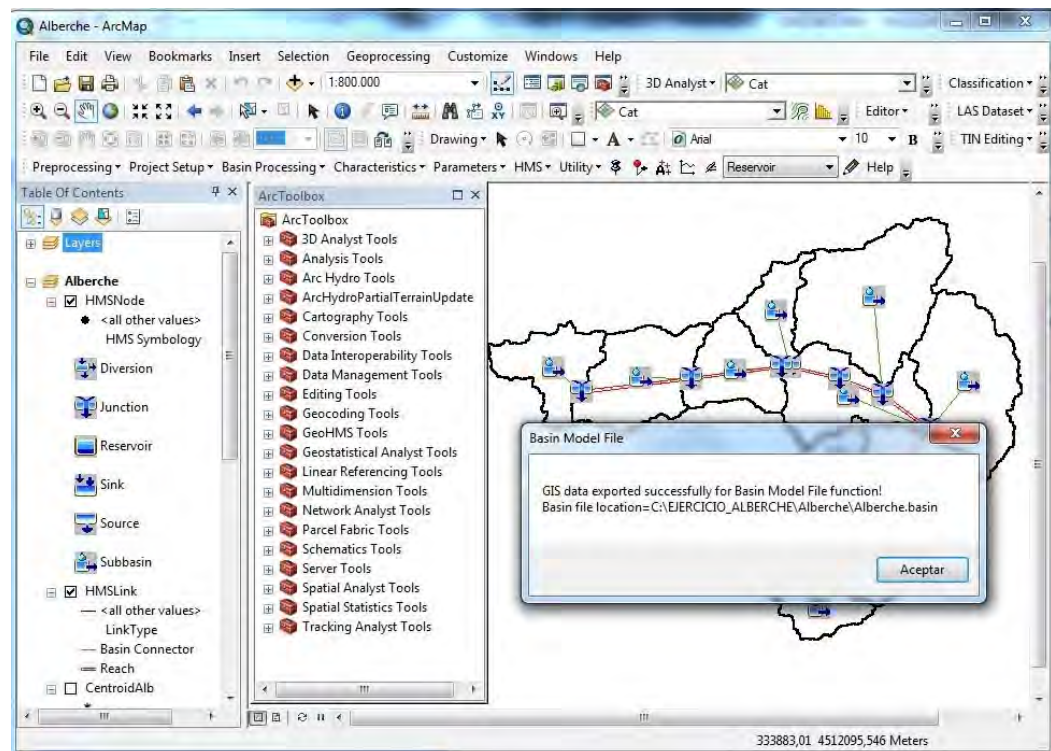


En *Subbasin* seleccionamos Subcuencas.

En *River* seleccionamos Cauces.

Paso 8. Definición del archivo del modelo de cuenca

HMS → Basin Model File



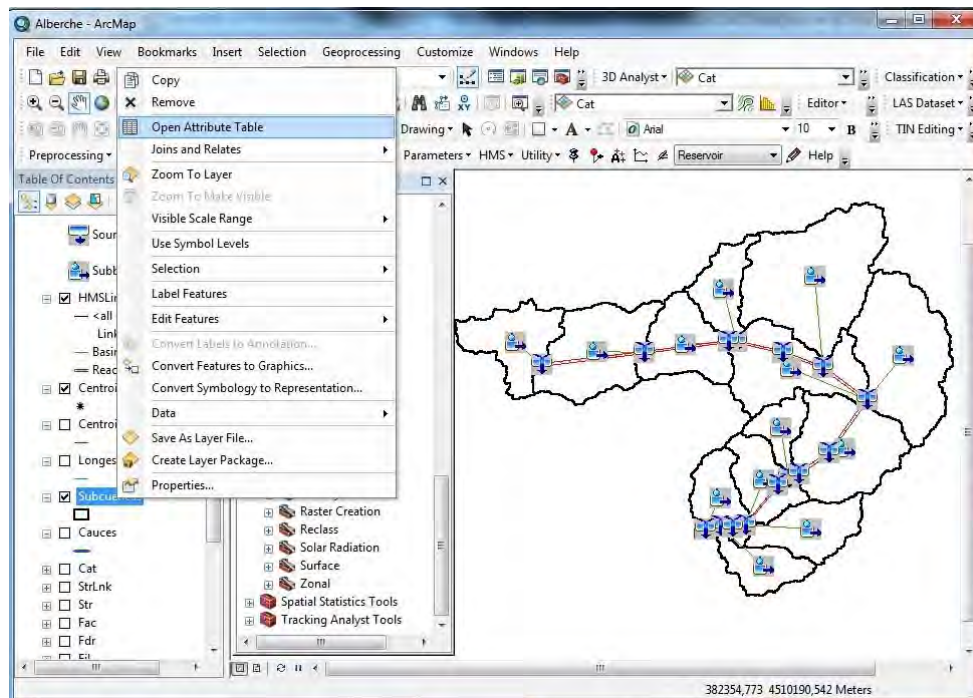
6.3. Resumen de las características de las subcuencas

En este apartado vamos a anotar los datos de superficie, longitud del cauce más largo y pendiente del mismo. Con los dos últimos valores podremos calcular el tiempo de concentración y el tiempo de retardo.

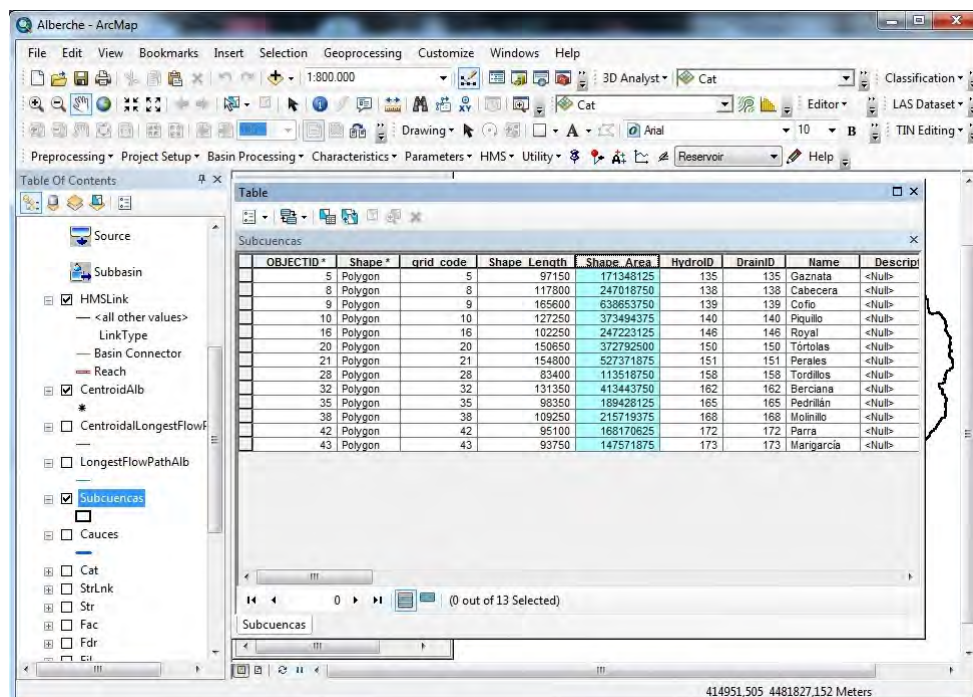
Paso 1. Visualización de las superficies de las subcuencas

Abrimos la tabla de atributos de la capa Subcuencas pinchando con el botón derecho sobre la misma.

Open Attribute Table



Y anotamos los valores de la columna *Shape_Area*



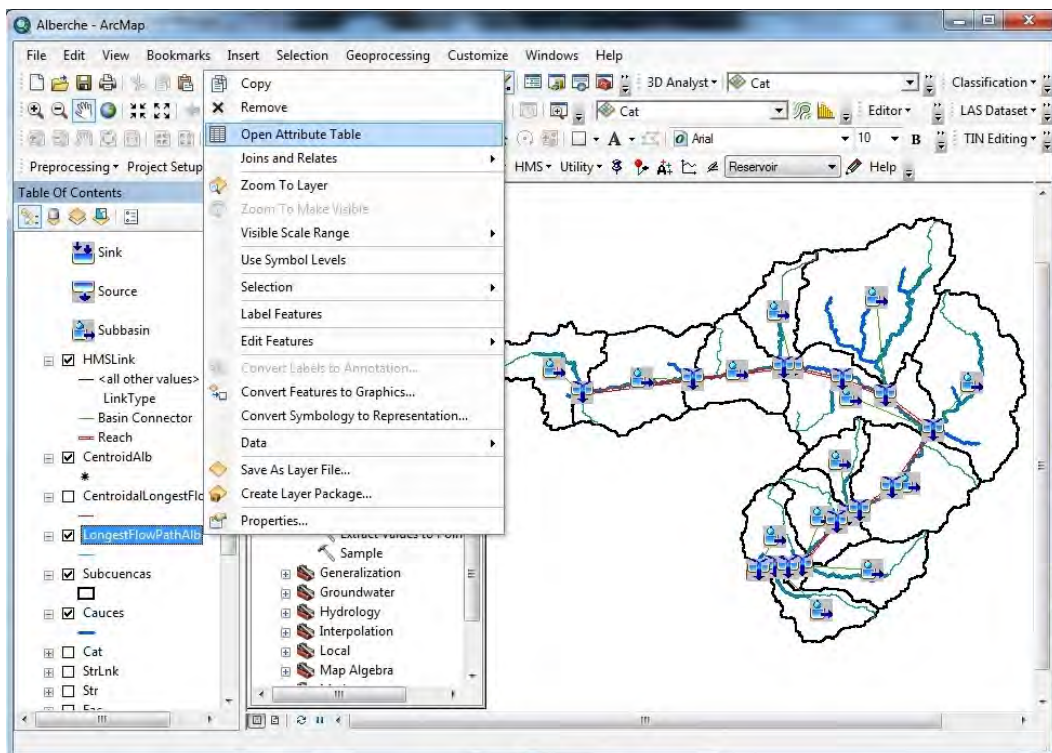
Las superficies de cada subcuenca se recogen en la siguiente tabla:

Subcuenca	Área (km ²)
Cabecera	247,019
Piquillo	373,494
Royal	247,722
Gaznata	171,348
Tórtolas	372,792
Cofio	638,653
Perales	527,372
Berciana	413,444
Tordillos	113,519
Pedrellán	189,428
Parra	168,171
Molinillo	215,719
Marigarcía	147,572

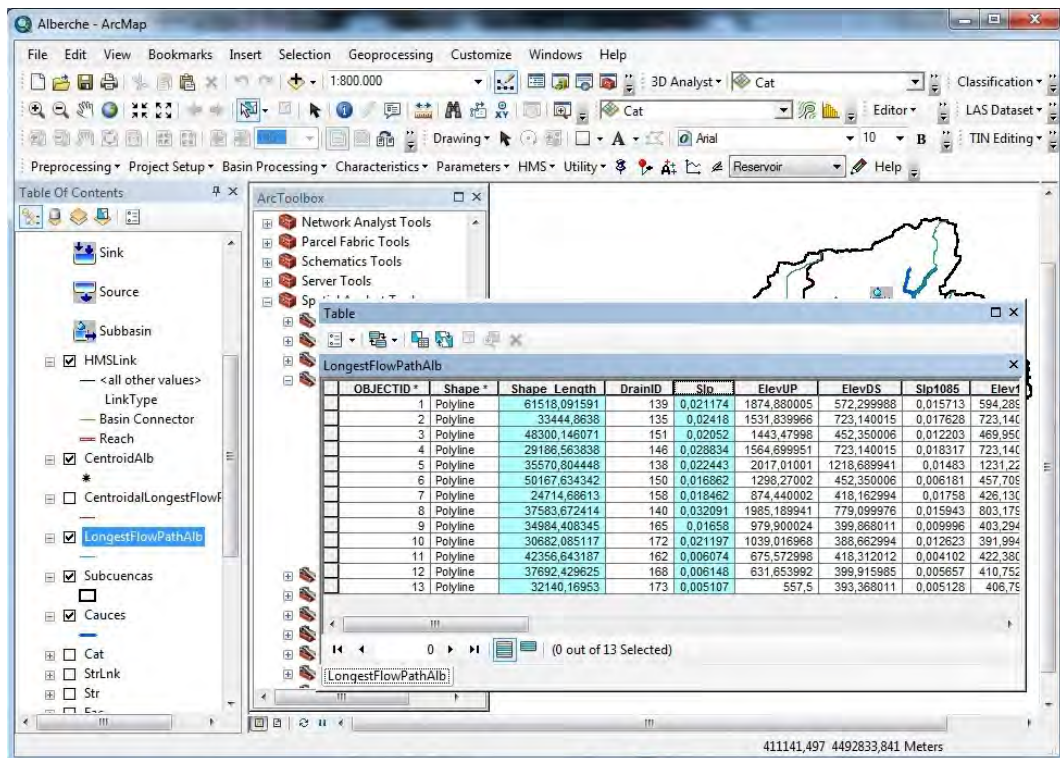
Paso 2. Visualización de la longitud y la pendiente de los cauces más largos

Abrimos la tabla de atributos de la capa LongestFlowPathAlb pinchando con el botón derecho sobre la misma.

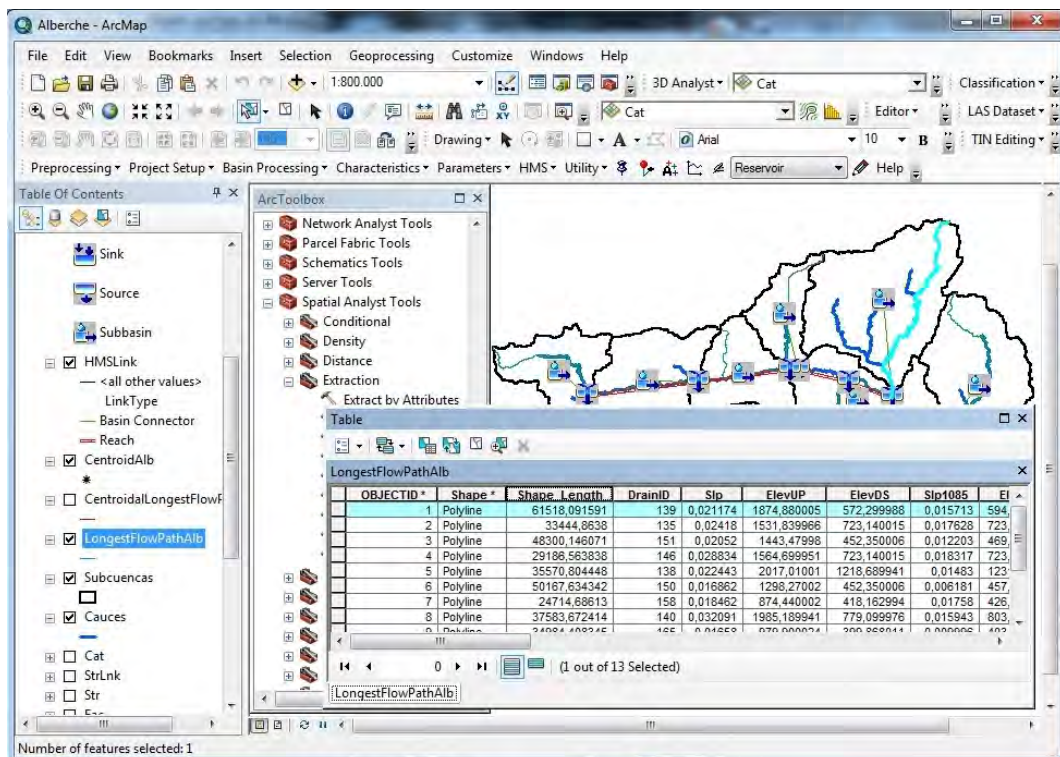
Open Attribute Table



Y anotamos los valores de las columnas *Shape_Length* y *Slp*.



En este caso no existe ningún campo que nos indique a qué subcuenca pertenece cada cauce, por lo que deberemos ir seleccionándolos de uno en uno en la tabla y viendo su situación sobre el mapa.



Paso 3. Cálculo del tiempo de concentración y el tiempo de retardo

Para calcular el tiempo de concentración y el tiempo de retardo a partir de los valores de longitud y pendiente de cauce utilizaremos las siguientes fórmulas:

Tiempo de concentración

Es el tiempo que tarda el agua en discurrir desde el punto más alejado de la cuenca hasta el punto de salida. Para calcularlo utilizaremos la fórmula de Témez:

$$T_c = \left[0,3 \left(\frac{L}{i^{0,25}} \right)^{0,76} \right]$$

donde:

- T_c : tiempo de concentración, en horas.
- L : longitud del recorrido más largo del agua en la subcuenca, en km.
- i : pendiente media del recorrido más largo en la subcuenca, en m/m.

Tiempo de retardo

Es el tiempo transcurrido desde el centro de gravedad del hietograma de precipitación neta hasta la punta del hidrograma. Este valor se estima para cada una de las subcuencas y es función del tiempo de concentración:

$$T_{lag} \approx 0,6 \cdot T_c$$

La siguiente tabla incluye los valores de longitud y pendiente de cada cauce, así como del tiempo de concentración y el tiempo de retardo:

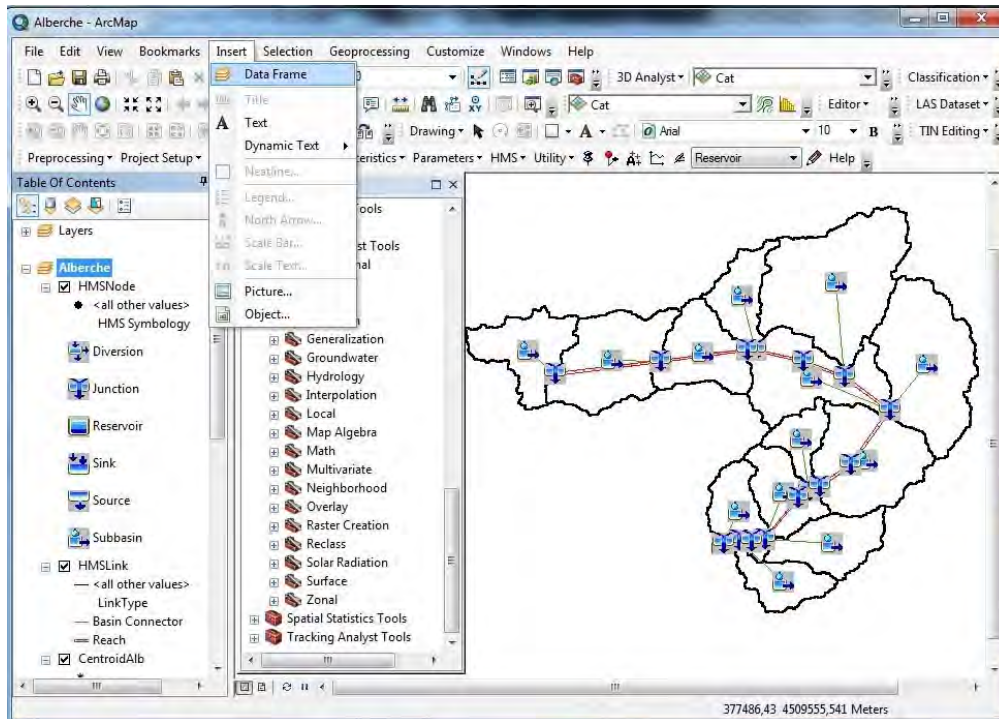
Subcuenca	Longitud (km)	Pendiente (m/m)	T_c (h)	T_{lag} (h)
Cabecera	35,571	0,0224	9,32	5,59
Piquillo	37,584	0,0321	9,08	5,45
Royal	29,187	0,0288	7,65	4,59
Gaznata	33,445	0,0242	8,76	5,26
Tórtolas	50,168	0,0169	12,77	7,66
Cofio	61,518	0,0212	14,28	8,57
Perales	48,300	0,0205	11,96	7,18
Berciana	42,357	0,0061	13,63	8,18
Tordillos	24,715	0,0185	7,33	4,40
Pedrillán	34,984	0,0166	9,74	5,85
Parra	30,682	0,0212	8,42	5,05
Molinillo	37,692	0,0061	12,47	7,48
Marigarcía	32,140	0,0051	11,43	6,86

6.4. Cálculo del Flujo Base


Paso 1. Creación de un nuevo Data Frame

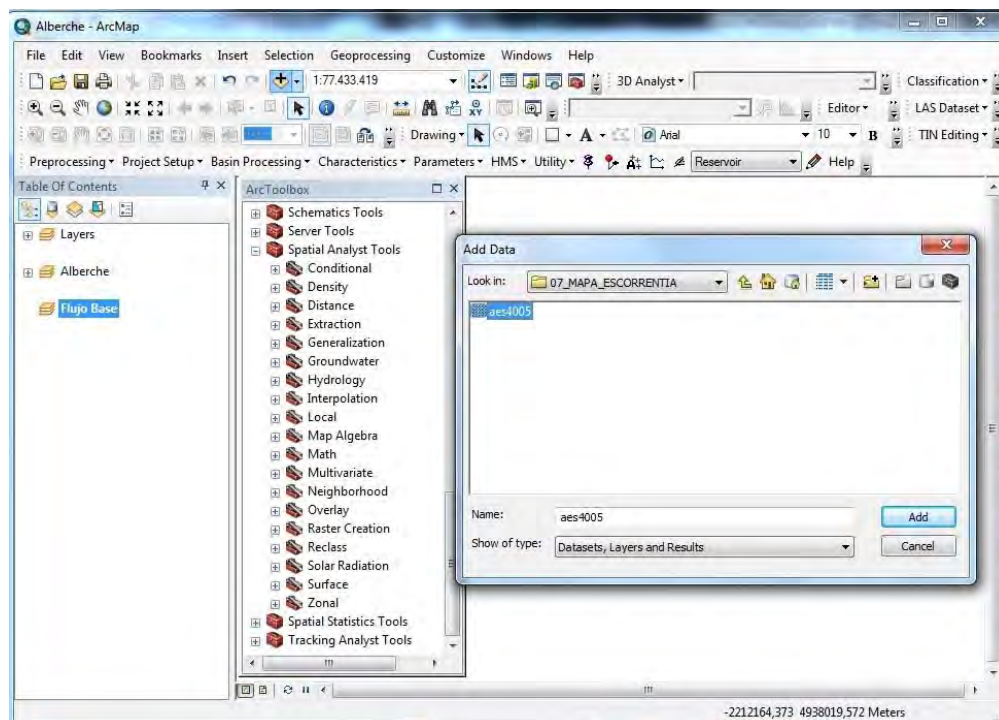
Para facilitar el trabajo con los diferentes archivos GIS creamos un conjunto de capas (*Data Frame*) que llamaremos Flujo Base y trabajaremos dentro de él.

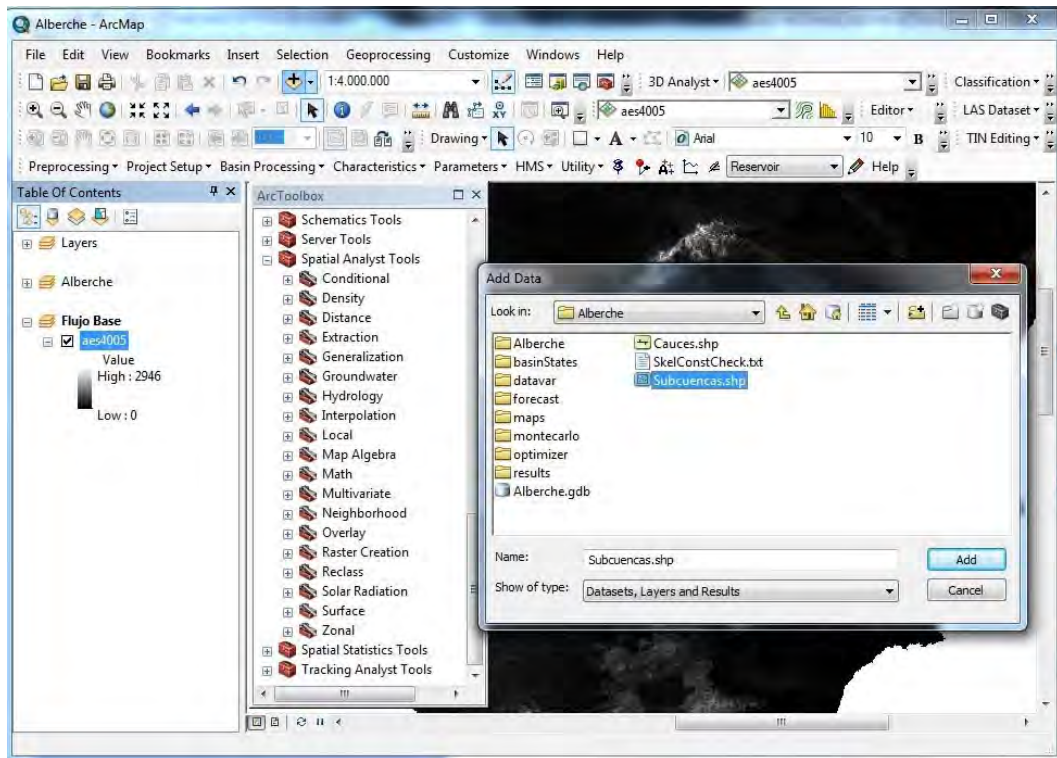
Insert → *Data Frame*



Paso 2. Carga del archivo ráster de escorrentía total anual y la capa de subcuencas


File → *Add Data* → *Add Data o* 

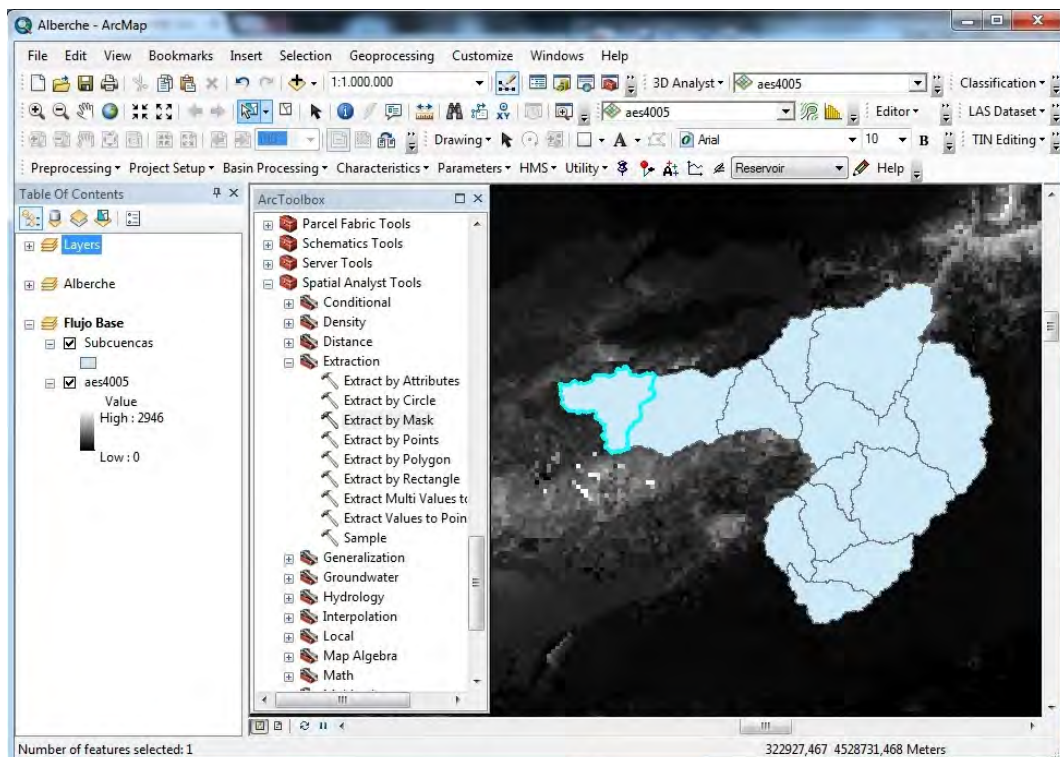




Paso 3. Cruce de ambas capas

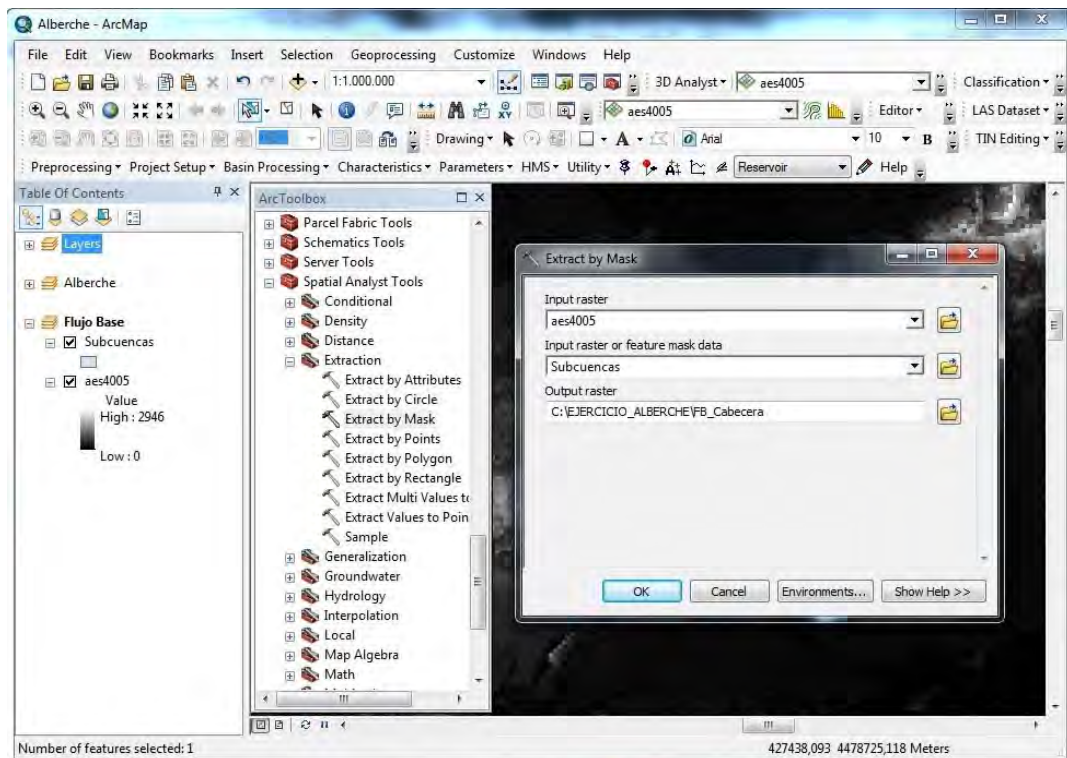
Al cruzar las capas se recorta el modelo ráster según la geometría de cada subcuencas.

En primer lugar seleccionamos la subcuenca que queremos cruzar mediante la herramienta *Select Features* . En el ejemplo se ha seleccionado la subcuenca Cabecera.



Y después utilizamos la herramienta *Extract by Mask* de *ArcToolbox*

ArcToolbox → *Spatial Analyst Tools* → *Extraction* → *Extract by Mask*



En *Input raster* seleccionamos aes4005.

En *Input raster or feature mask data* seleccionamos Subcuencas.

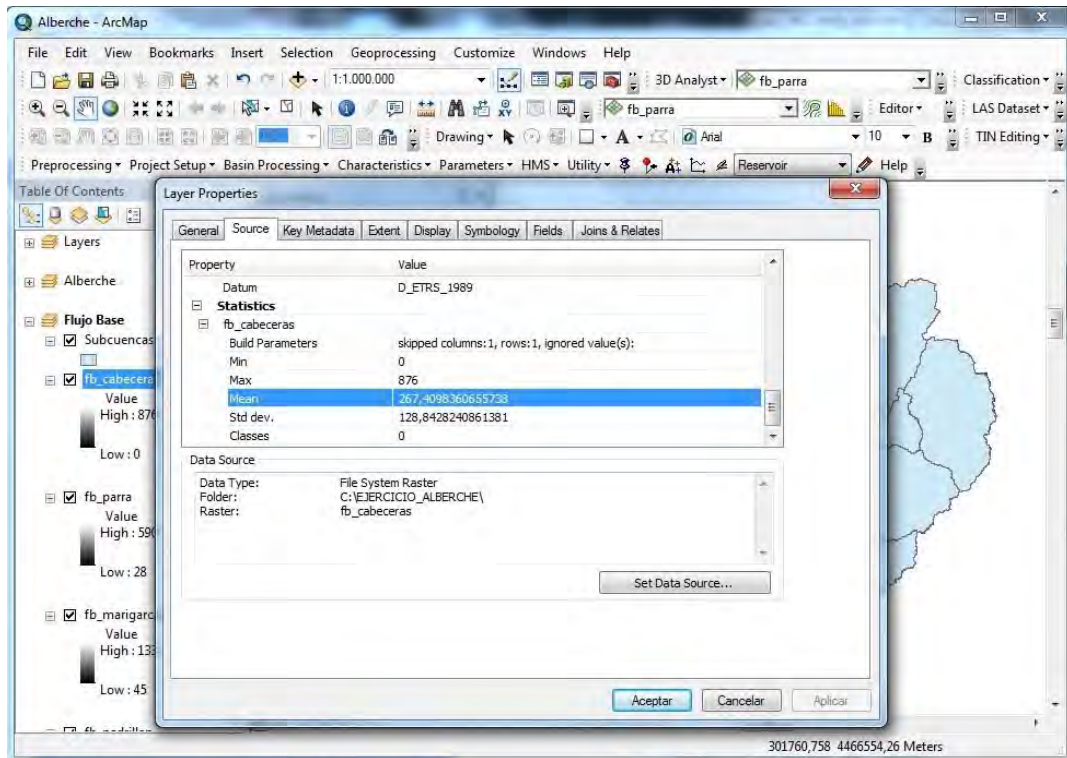
En *Output raster* damos nombre al archivo (FB_Cabecera).

Repetimos el proceso con las otras 12 subcuencas.

Paso 4. Cálculo del caudal asociado al flujo base

En primer lugar obtenemos el valor medio de todos los valores de las celdas. Para ello entramos en las propiedades de la capa pinchando con el botón derecho sobre la misma.

Layer Properties → *Source* → *Statistics* → *Mean*



Según los resultados, el valor medio de escorrentía de la subcuenca Cabecera es de 267,41 mm/año. Conociendo la superficie de la subcuenca (247,019 km²) y el tamaño de las celdas (1 x 1 km) se obtiene el Flujo Base (2,095 m³/s).

Los resultados para el resto de subcuencas son:

Subcuenca	Escorrentía media (mm/año)	Área (km ²)	Caudal inicial (m ³ /s)
Cabecera	267,41	247,019	2,095
Piquillo	298,84	373,494	3,539
Royal	342,83	247,722	2,693
Gaznata	186,79	171,348	1,015
Tórtolas	180,71	372,792	2,136
Cofio	256,46	638,653	5,194
Perales	89,14	527,372	1,491
Berciana	56,70	413,444	0,743
Tordillos	161,77	113,519	0,582
Pedrillán	102,80	189,428	0,617
Parra	109,07	168,171	0,582
Molinillo	52,90	215,719	0,362
Marigarcía	58,99	147,572	0,276

6.5. Cálculo del Número de Curva de las subcuencas

Para calcular el número de curva se utilizará el método desarrollado en el artículo "Generación automática del número de curva con sistemas de información geográfica" (Ferrer *et al.* 1995), que se basa en asignar un número primo a cada variable que interviene en el proceso hidrológico (pendiente, tipos de suelos y usos del suelo).

6.5.1. Elaboración de mapa de pendientes

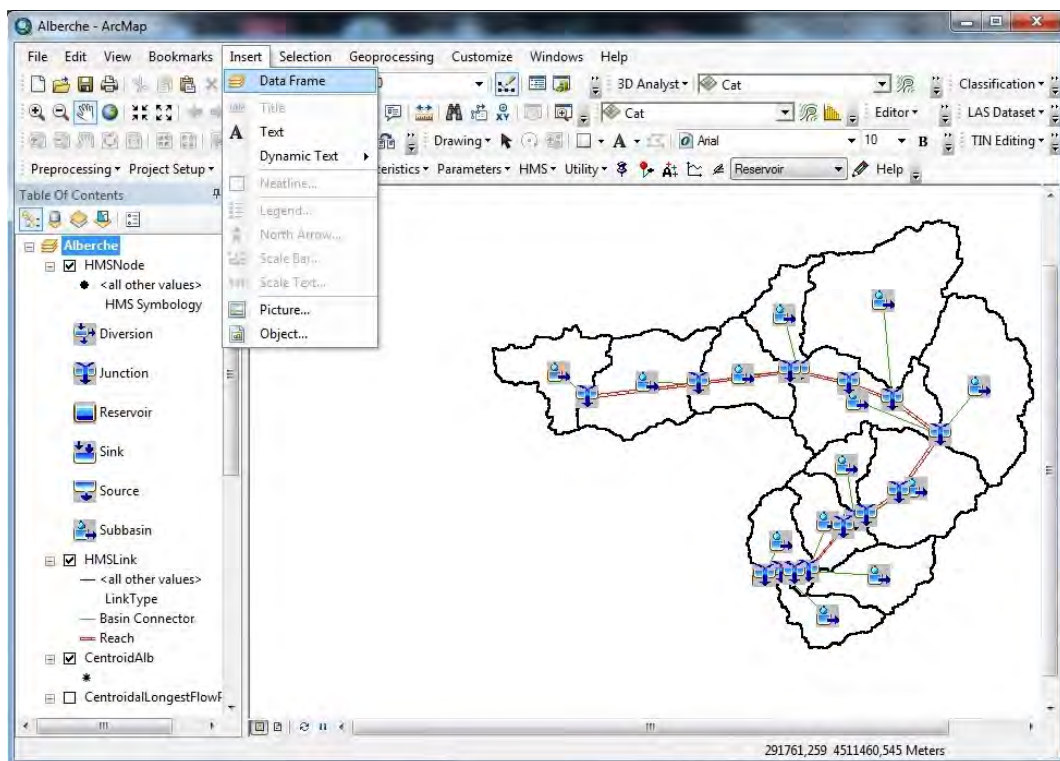
Se asignarán los siguientes códigos:

Pendiente	Código
< 3%	1
≥ 3%	2


Paso 1. Creación de un nuevo Data Frame

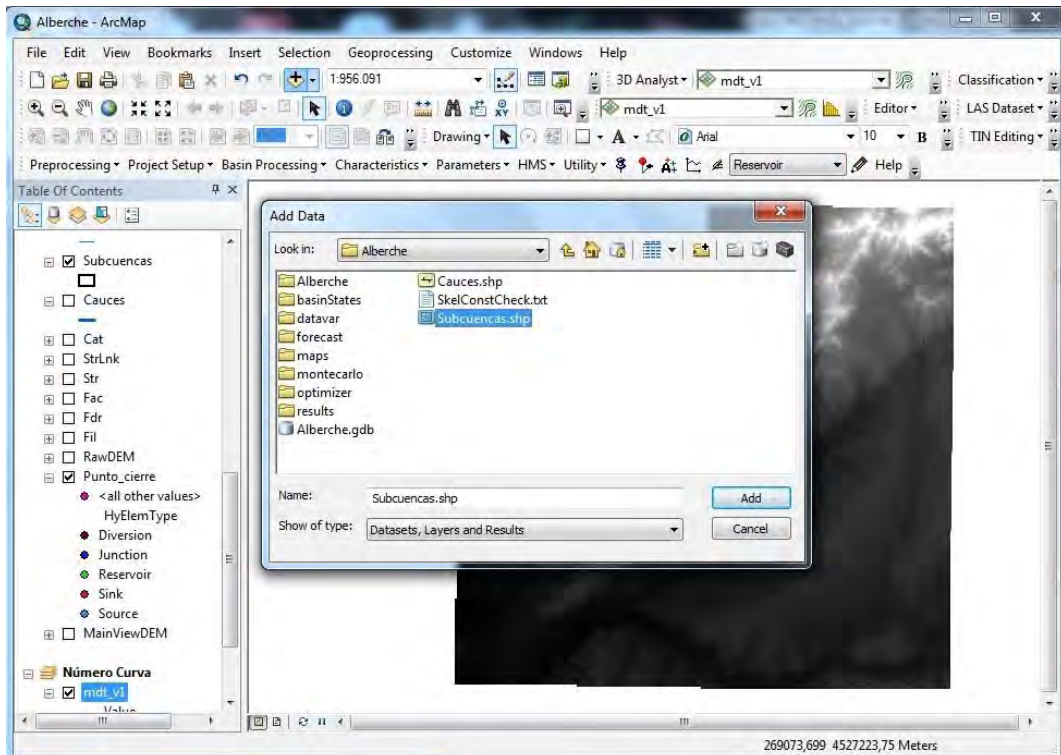
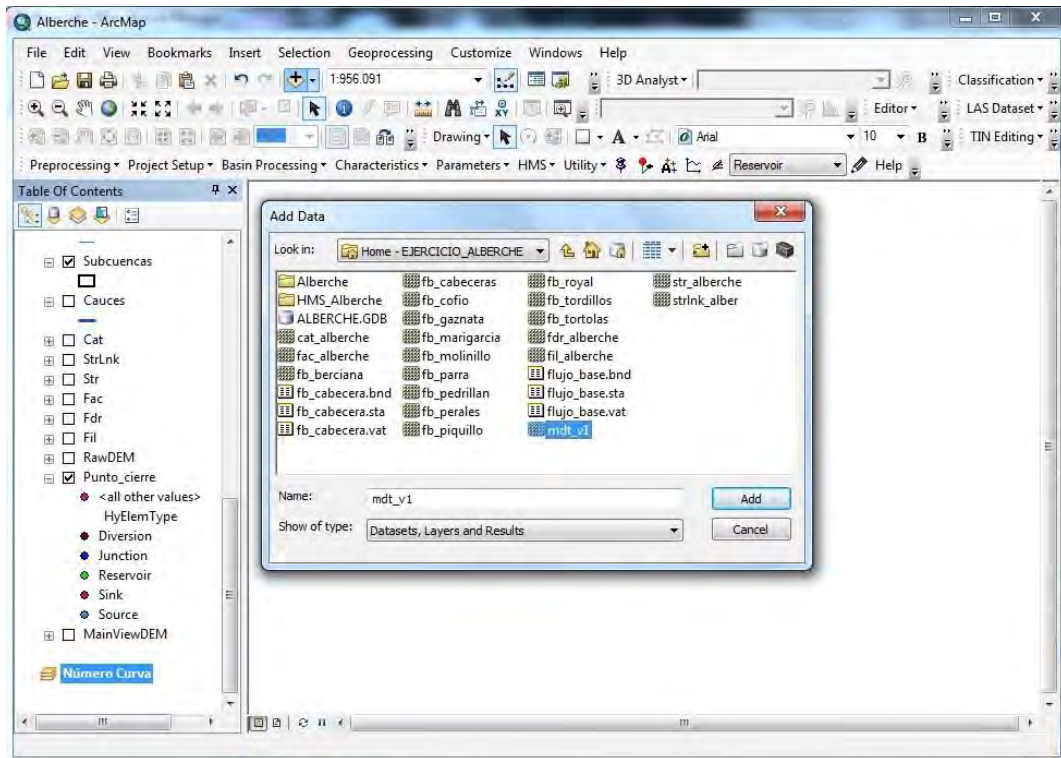
Para facilitar el trabajo con los diferentes archivos GIS creamos un conjunto de capas (*Data Frame*) que llamaremos Número Curva y trabajaremos dentro de él.

Insert → **Data Frame**



Paso 2. Carga del archivo ráster del MDT y la capa de subcuencas

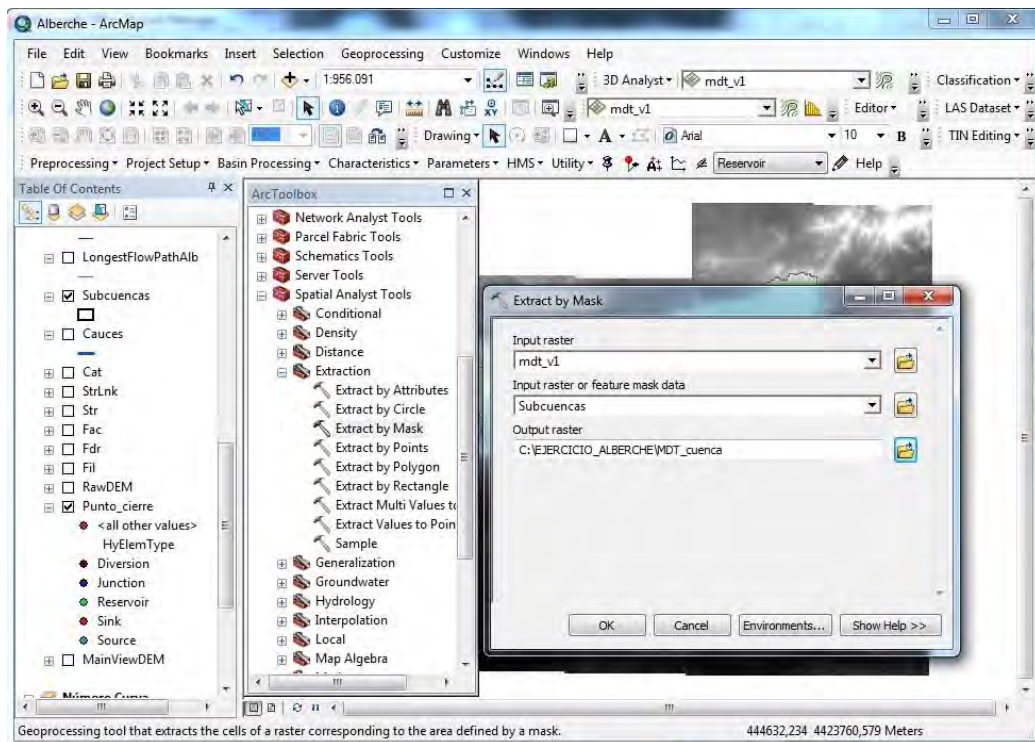
File → Add Data → Add Data o 



Paso 3. Cruce de ambas capas

Al cruzar las capas se recorta el modelo ráster según la geometría de cada subcuencas. Para ello utilizamos la herramienta *Extract by Mask* de *ArcToolbox*

ArcToolbox → Spatial Analyst Tools → Extraction → Extract by Mask



En *Input raster* seleccionamos mdt_v1.

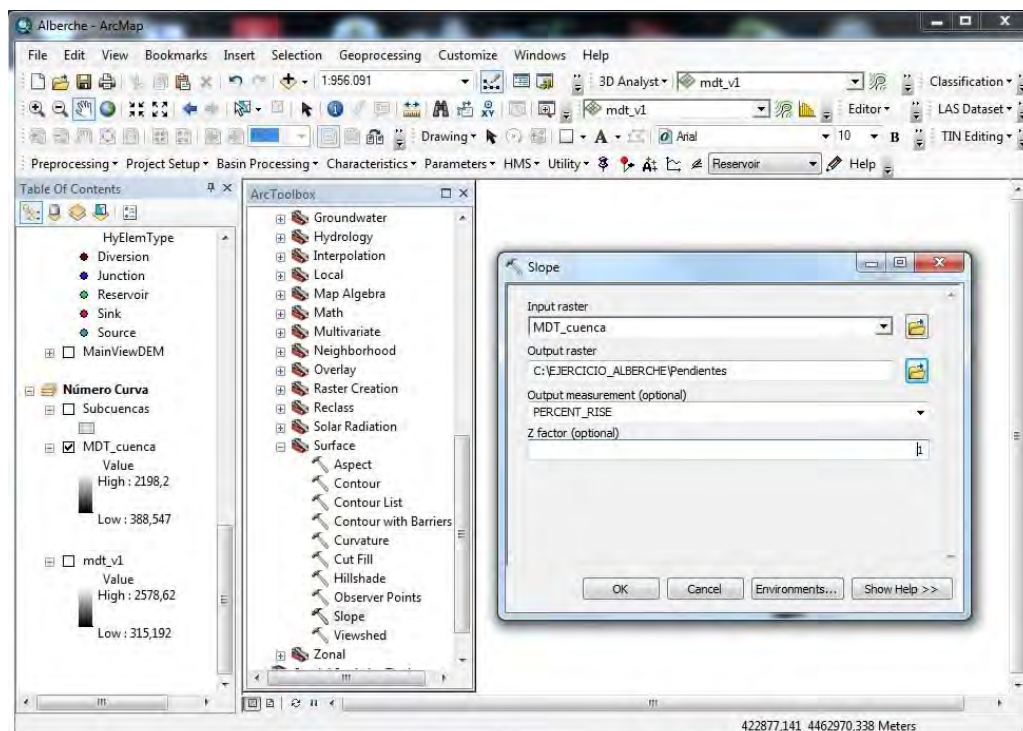
En *Input raster or feature mask data* seleccionamos Subcuencas.

En *Output raster* damos nombre al archivo (MDT_cuenca).

Paso 4. Creación del mapa de pendientes

Utilizamos la herramienta *Slope* de *ArcToolbox*

ArcToolbox → Spatial Analyst Tools → Surface → Slope



En *Input raster* seleccionamos MDT_cuenca.

En *Output raster* damos nombre al archivo (Pendientes).

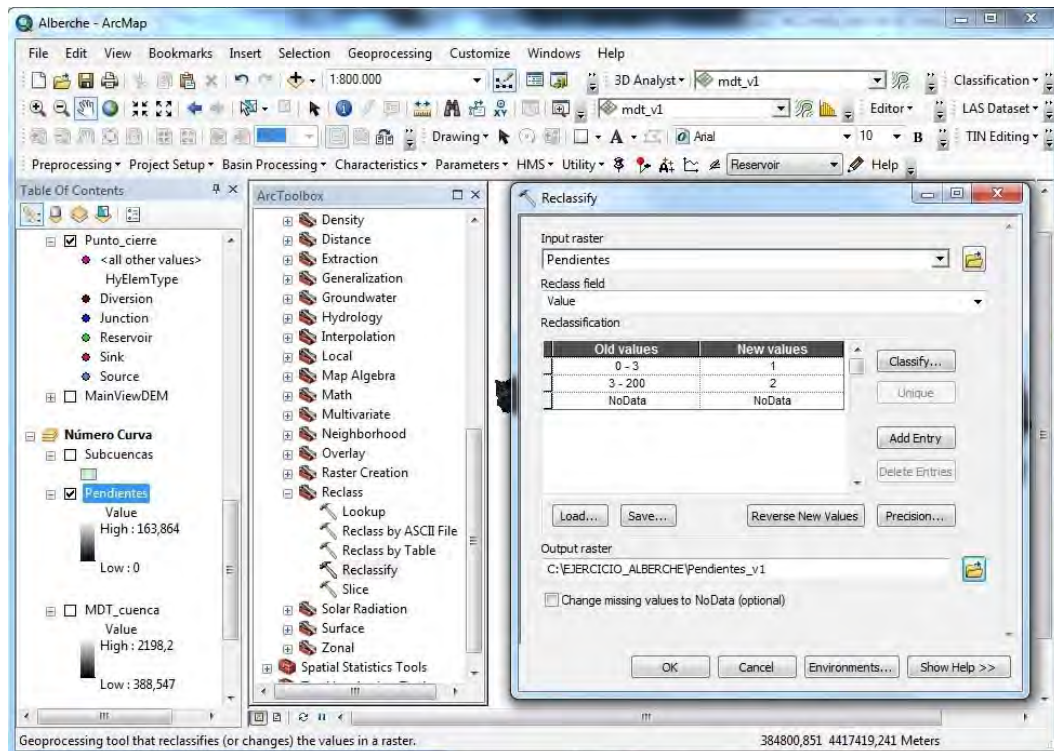
En *Output measurement (optional)* seleccionamos PERCENT_RISE, para que las pendientes vengan expresadas en porcentaje.

Paso 5. Reclasificación de las pendientes

Reclasificamos las pendientes en mayores y menores del 3 %.

Utilizamos la herramienta *Reclassify* de *ArcToolbox*

ArcToolbox → *Spatial Analyst Tools* → *Reclass* → *Reclassify*



En *Input raster* seleccionamos Pendientes.

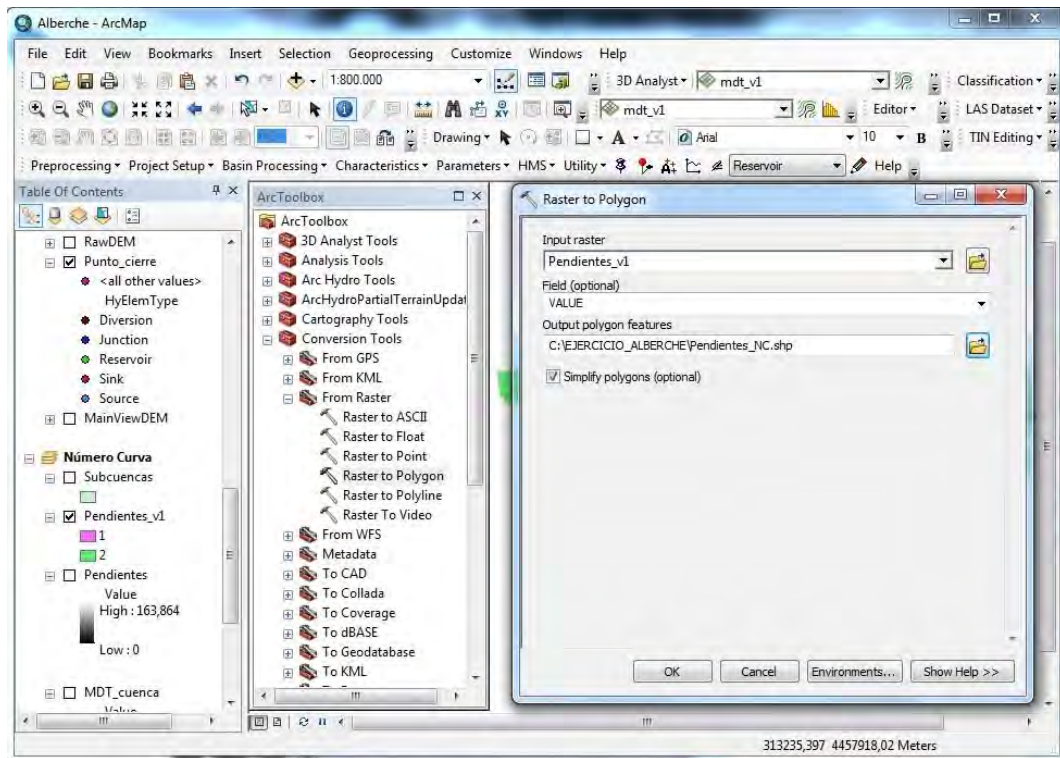
En *Reclass Field* seleccionamos *Value*.

En la tabla de *Reclassification* introducimos los nuevos intervalos. Para ello pinchamos en *Add Entry*.

En *Output raster* damos nombre al archivo (Pendientes_v1).

Paso 6. Conversión del fichero a formato vectorial

ArcToolbox → Conversion Tools → From Raster → Raster to Polygon



En *Input raster* seleccionamos Pendientes_v1.

En *Field (optional)* seleccionamos *Value*.


En *Output polygon features* damos nombre al archivo (Pendientes_NC).

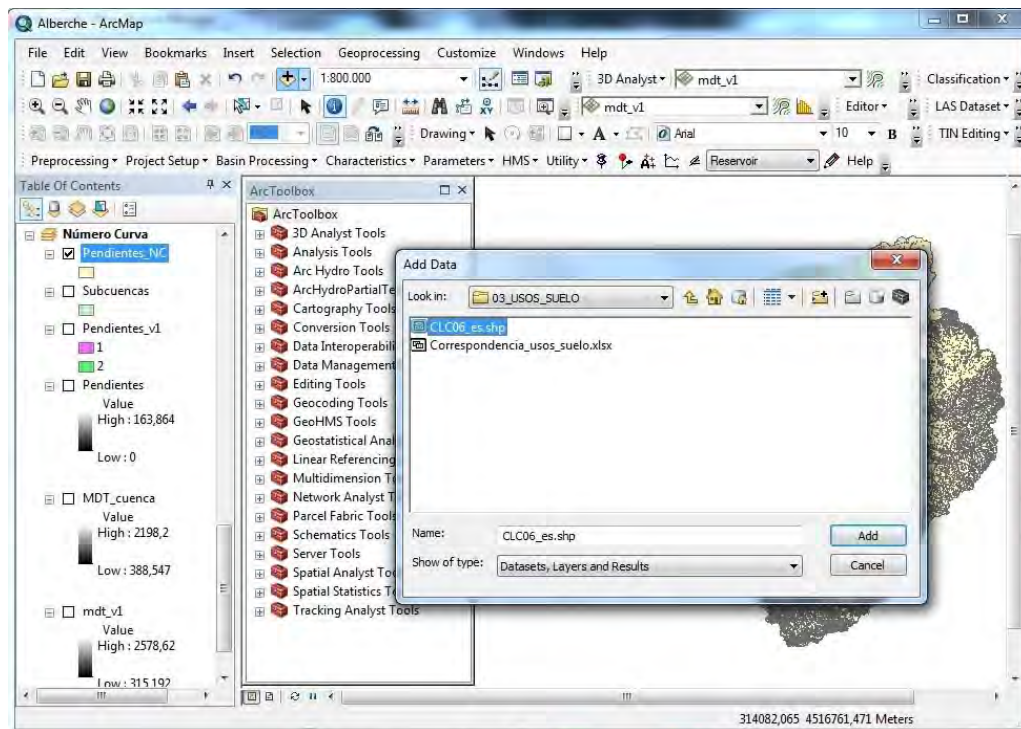
6.5.2. Elaboración de mapa de usos del suelo

En primer lugar es necesario establecer la correspondencia entre los usos del suelo del CORINE y los del SCS. Esta correspondencia se ha obtenido del artículo "Aportación de la teledetección para la determinación del parámetro hidrológico del número de curva" (Ferrer *et al.* 1998). Los tipos de usos del suelo localizados en la zona de estudio y sus códigos asociados se encuentran en el archivo Correspondencia_usos_suelo.xlsx.

Paso 1. Carga la capa de usos del suelo

Los usos del suelo se encuentran en el archivo CLC06_es.shp.

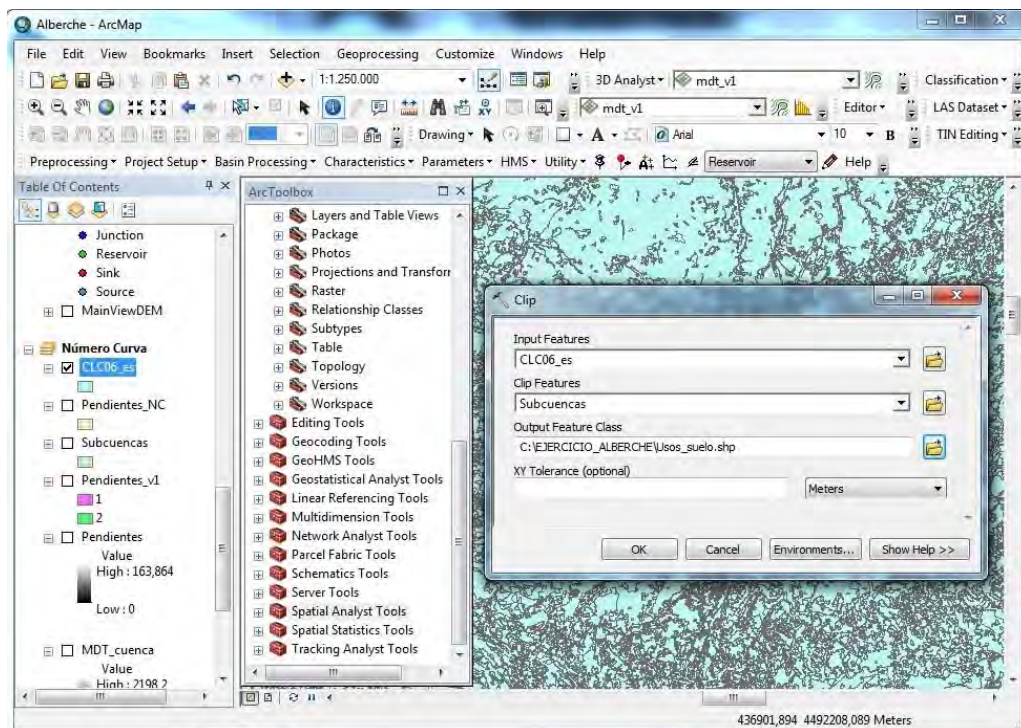
File → **Add Data** → **Add Data** 



Paso 2. Recorte con la capa de subcuencas

Utilizamos la herramienta *Clip* de *Geoprocessing*.

Geoprocessing → **Clip**



En *Input Features* seleccionamos CLC06_es.

En *Clip Features* seleccionamos Subcuencas.

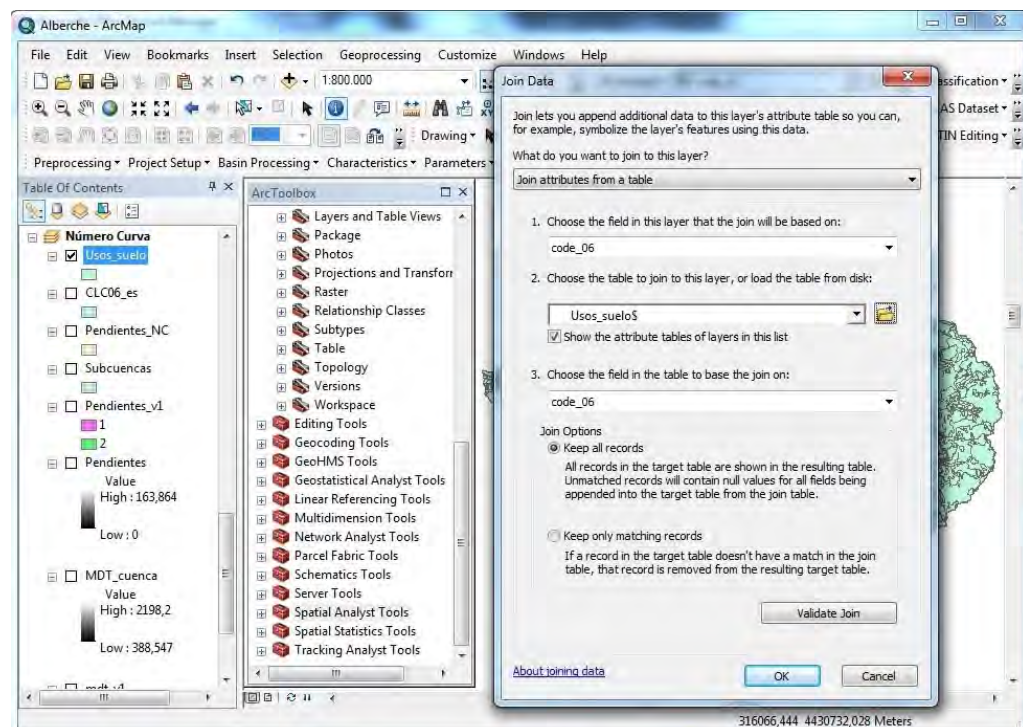
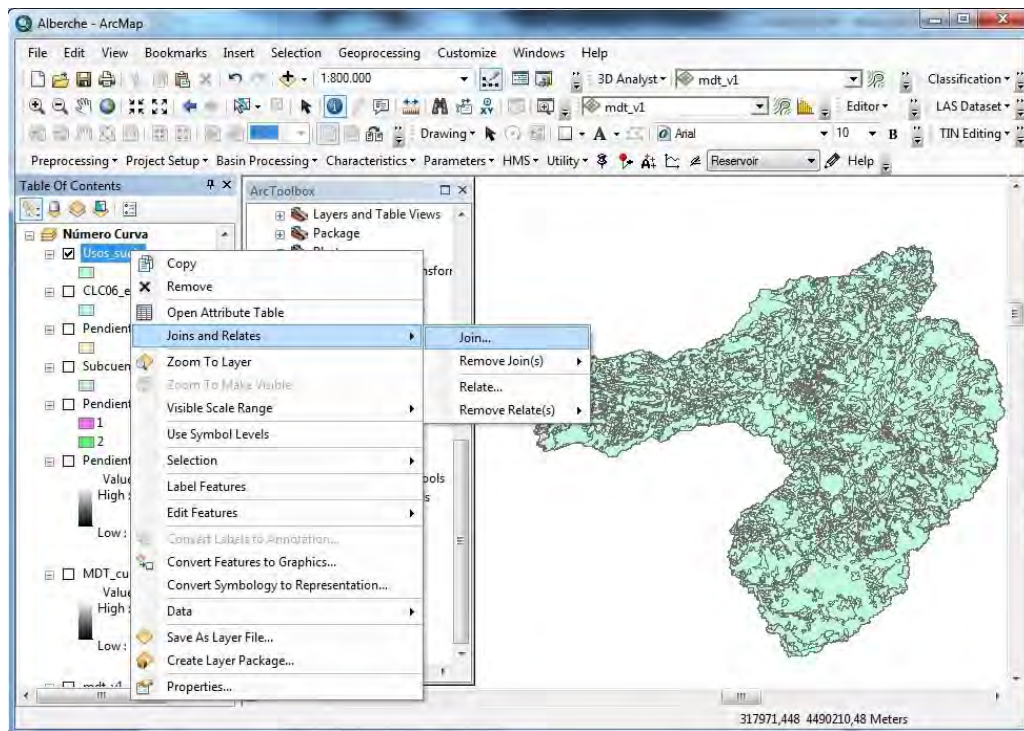
En *Output Features Class* damos nombre al archivo (Usos_suelo).

Paso 3. Asignación de códigos a los usos del suelo

Para ello realizamos una asociación entre los códigos del mapa del CORINE y los códigos del método de los números primos, mediante la tabla Correspondencia_usos_suelo.xlsx.

Pinchamos con el botón derecho sobre la capa Usos_suelo:

Joins and Relates → Join



En el punto 1 seleccionamos el campo de la capa Usos_suelo que queremos utilizar para realizar la unión (code_06).

En el punto 2 seleccionamos el archivo (Correspondencia_usos_suelo.xlsx) y la pestaña del mismo (Usos_suelo) donde se encuentra la relación entre los códigos.

En el punto 3 seleccionamos la columna de la tabla con la que se realizará la unión (code_06).

6.5.3. Elaboración de mapa de grupos hidrológicos

Se asignarán los siguientes códigos:

Grupo hidrológico	Código
A	3
B	5
C	7
D	11

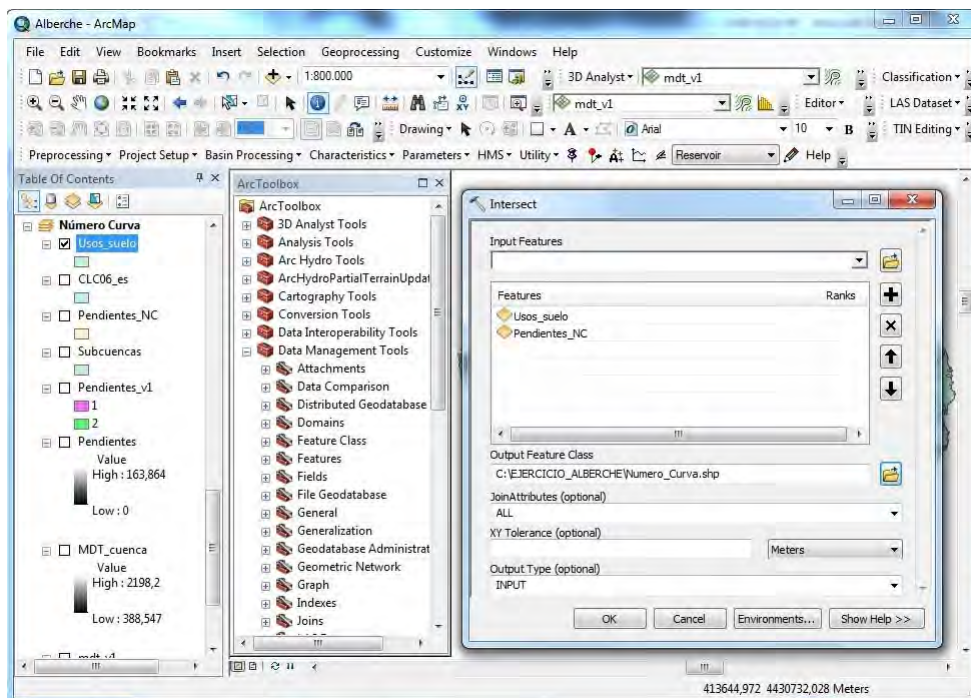
Según la nueva Norma 5.2-IC de Drenaje Superficial, toda la cuenca de estudio se encuentra en zona B, por lo que el código asignado es el 5. Al tener toda la cuenca el mismo código, no es necesario elaborar el mapa correspondiente. Este valor se tendrá en cuenta al multiplicar los valores de los diferentes parámetros.

6.5.4. Asignación de valores del método de números primos

Paso 1. Cruce de mapas

En primer lugar cruzamos las capas de usos del suelo y de pendientes.

Geoprocessing → Intersect

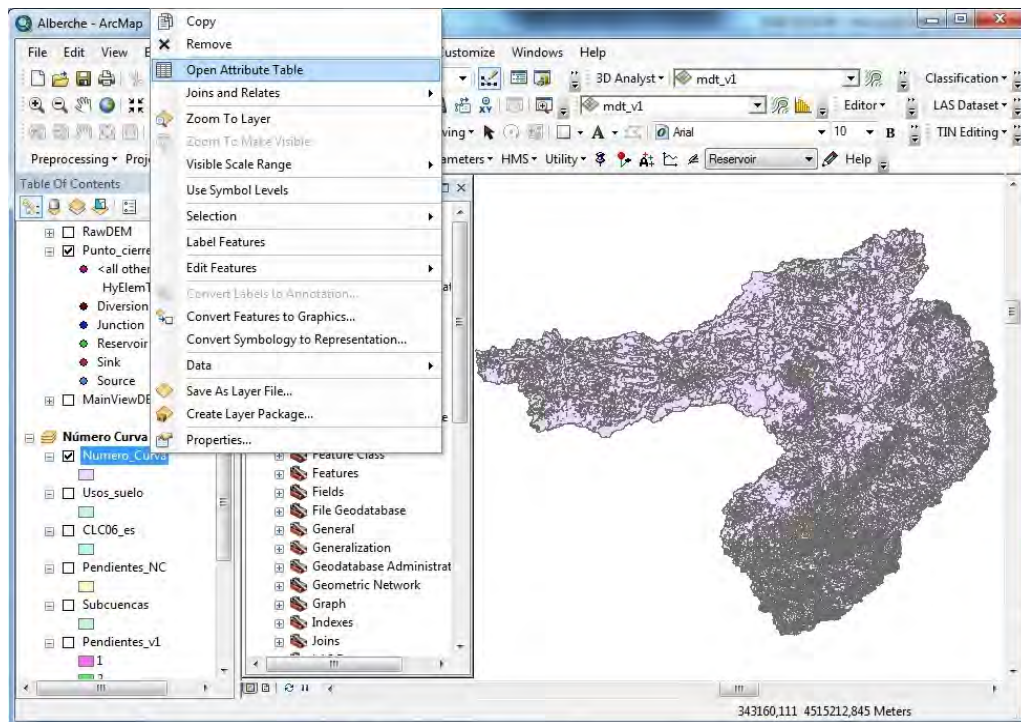


En *Input Features* seleccionamos las capas que queremos cruzar (Usos_suelo y Pendientes_NC).

En *Output Features Class* damos nombre al archivo (Numero_Curva).

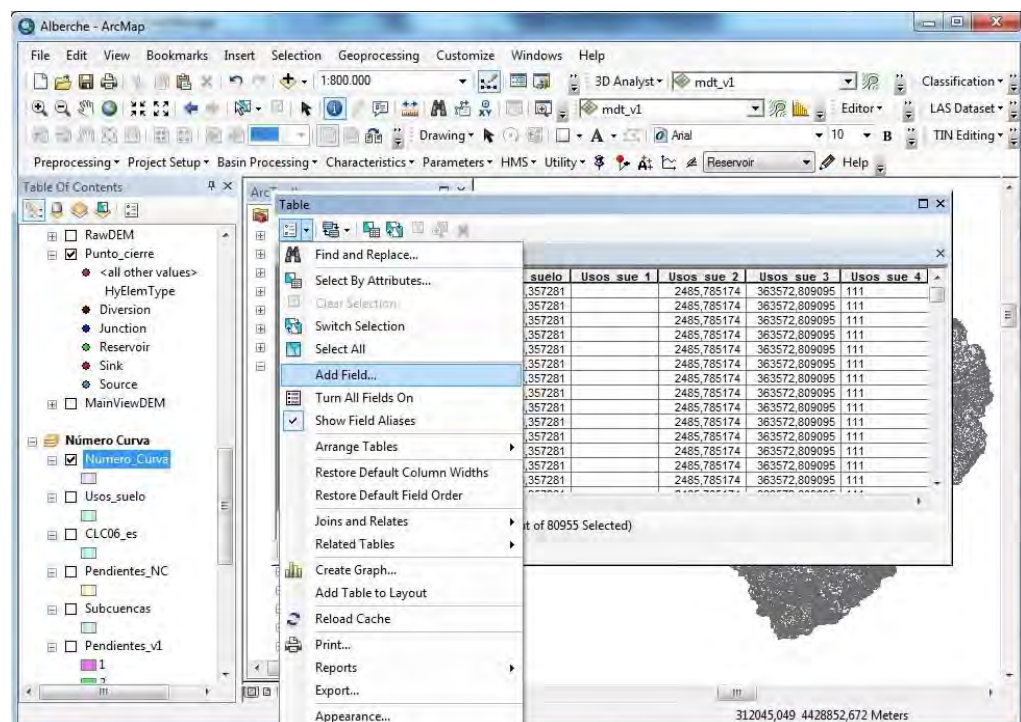
Paso 2. Creación de un campo para el código final del método de números primos

Abrimos la tabla de atributos de la capa Numero_Curva pinchando con el botón derecho sobre la misma.

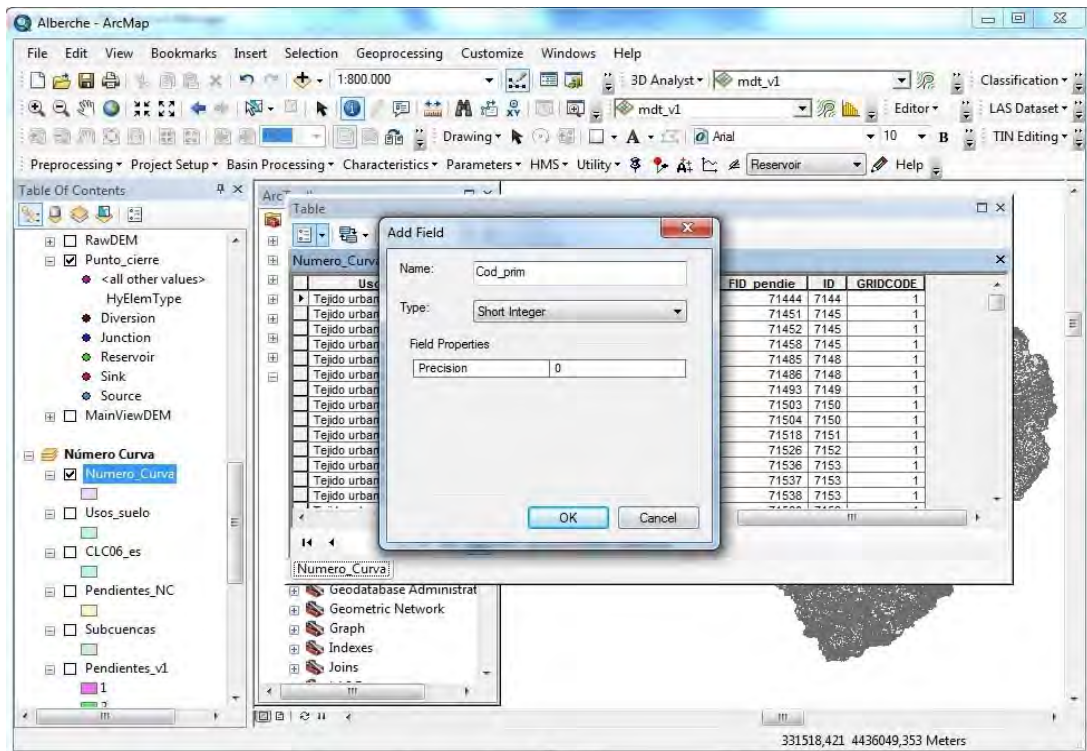


Añadimos la nueva columna.

Table → Add Field...



Definimos las características del campo



En *Name* damos el nombre al nuevo campo (Cod_prim).

En *Type* seleccionamos *Short Integer*.

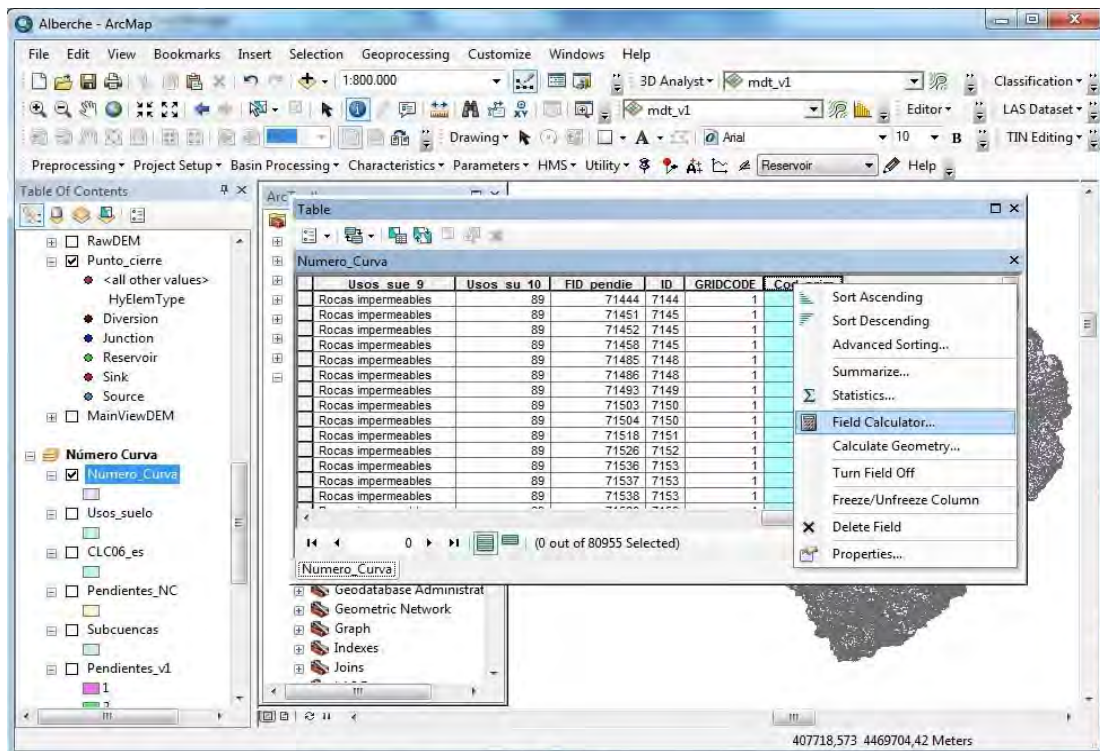
En *Fields Properties, Precision*, marcamos el número de decimales (0).

Paso 3. Cálculo del código final del método de números primos

El código se obtiene multiplicando los valores asignados a las pendientes, los usos del suelo y los grupos hidrológicos.

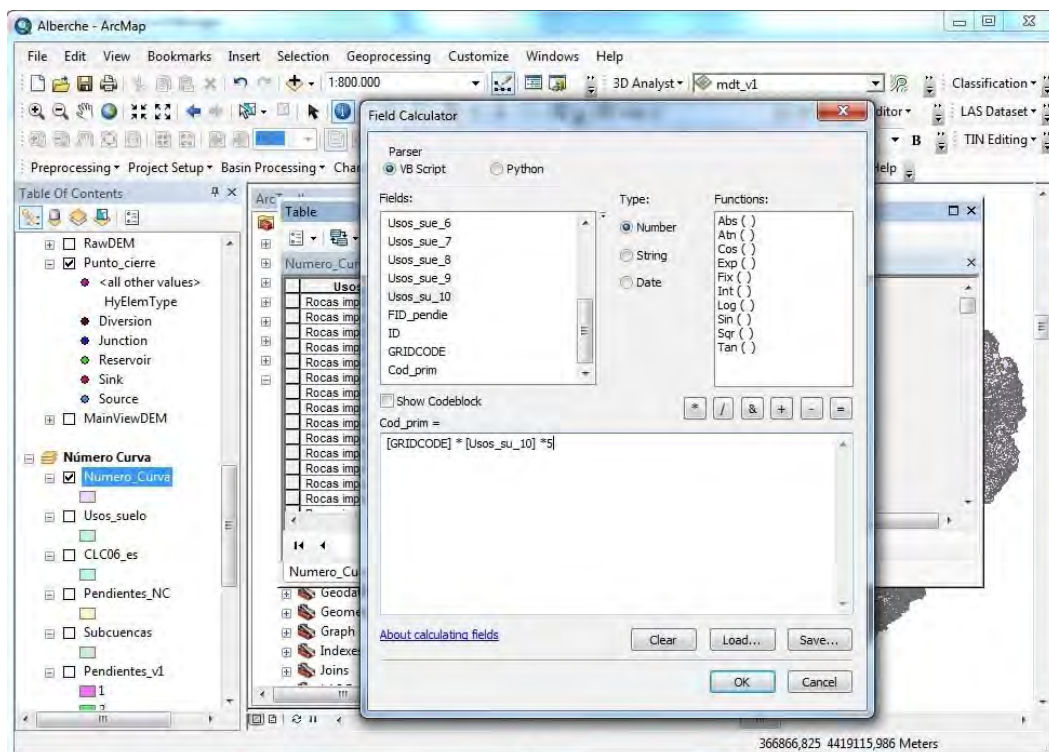
Dentro de la capa *Numero_Curva*, el código de la pendiente está en el campo *GRIDCODE*, el del uso del suelo está en el campo *Usos_su_10* y el del grupo hidrológico, como se ha comentado anteriormente, es 5 para toda la cuenca.

Para realizar la multiplicación de los valores, pinchamos con el botón derecho sobre la columna *Cod_prim* y seleccionamos *Field Calculator*.



Indicamos la operación a realizar:

$$\text{Cod_prim} = [\text{GRIDCODE}] * [\text{Usos_su_10}] * 5$$



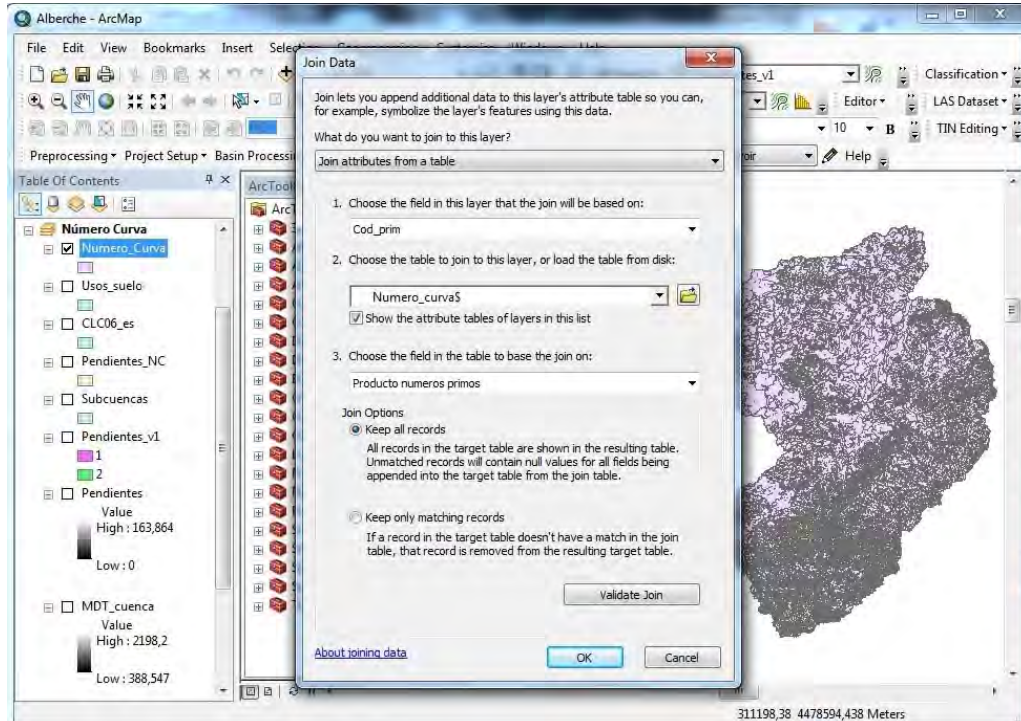
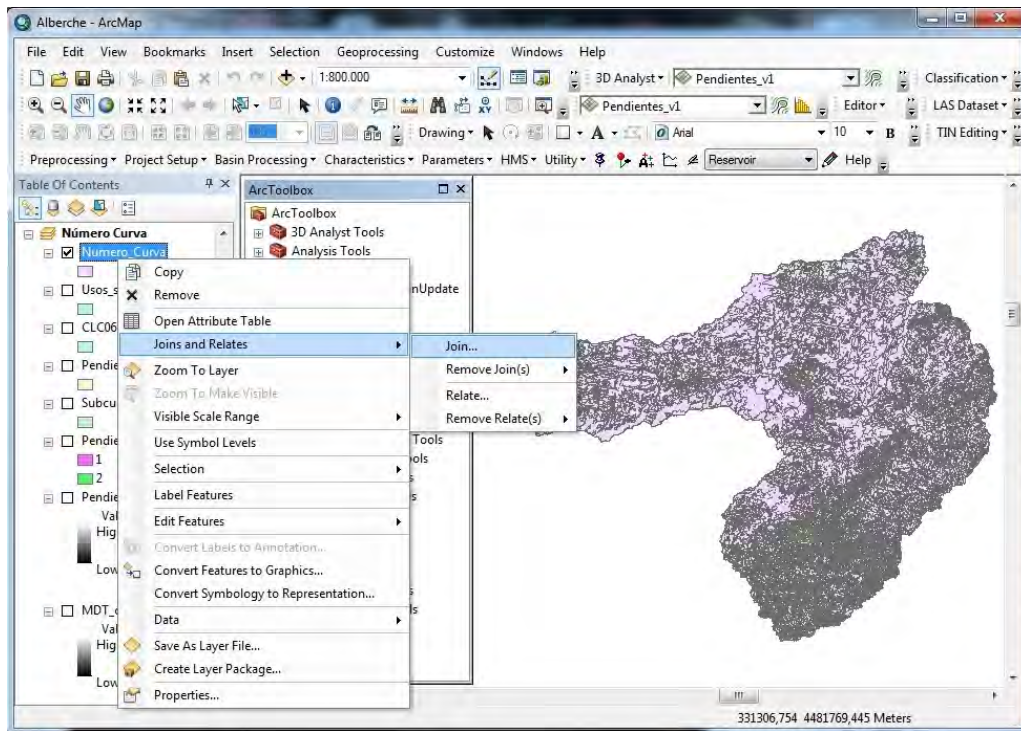
6.5.5. Asignación de valores de Número de Curva

Mediante la tabla auxiliar Número_curva.xlsx asignamos el valor de cada código del método de números primos a un valor de número de curva.

Paso 1. Unión de tablas

Pinchamos con el botón derecho sobre la capa Numero_Curva:

Joins and Relates → Join



En el punto 1 seleccionamos el campo de la capa Numero_Curva que queremos utilizar para realizar la unión (Cod_prim).

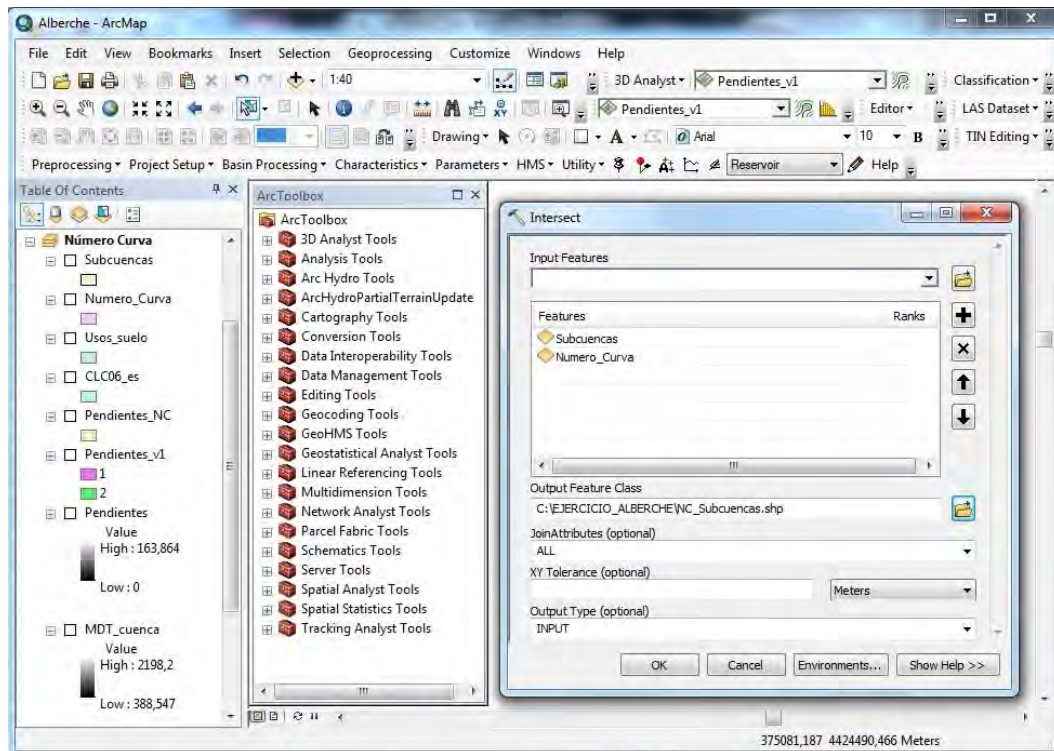
En el punto 2 seleccionamos el archivo (Número_curva.xlsx) y la pestaña del mismo (Numero_curva) donde se encuentra la relación entre los códigos.

En el punto 3 seleccionamos la columna de la tabla con la que se realizará la unión (Producto numeros primos).

Paso 2. Cruce de la capa del Número de Curva y de las subcuencas

Como cada subcuena va a tener su propio valor de número de curva, es necesario cruzar el mapa completo de números de curva con cada una de las subcuencas.

Geoprocessing → *Intersect*



En *Input Features* seleccionamos las capas que queremos cruzar (Subcuencas y Numero_Curva).

En *Output Features Class* damos nombre al archivo (NC_Subcuencas).

Paso 3. Cálculo del número de curva por subcuena

Abrimos con Excel el archivo NC_Subcuencas.dbf. En la tabla de registros, separamos por subcuena y multiplicamos el valor del número de curva por la superficie de cada registro. Finalmente sumamos estos productos y lo dividimos entre la superficie total de la subcuena para calcular la media ponderada.

Los resultados obtenidos para cada subcuena son:

Subcuena	Número Curva
Cabecera	59,07
Piquillo	61,47
Royal	60,64
Gaznata	59,79
Tórtolas	61,05

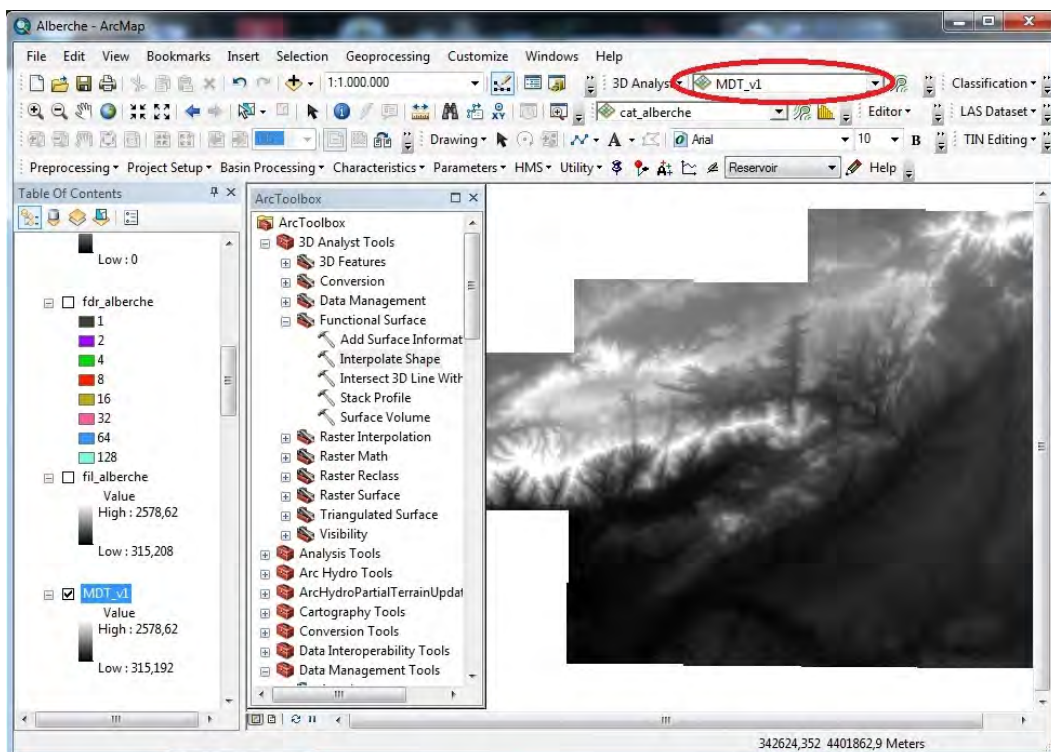
Subcuenca	Número Curva
Cofio	58,62
Perales	63,59
Berciana	63,58
Tordillos	62,56
Pedrillán	62,68
Parra	60,33
Molinillo	70,61
Marigarcía	69,85


6.6. Definición de la geometría de los cauces

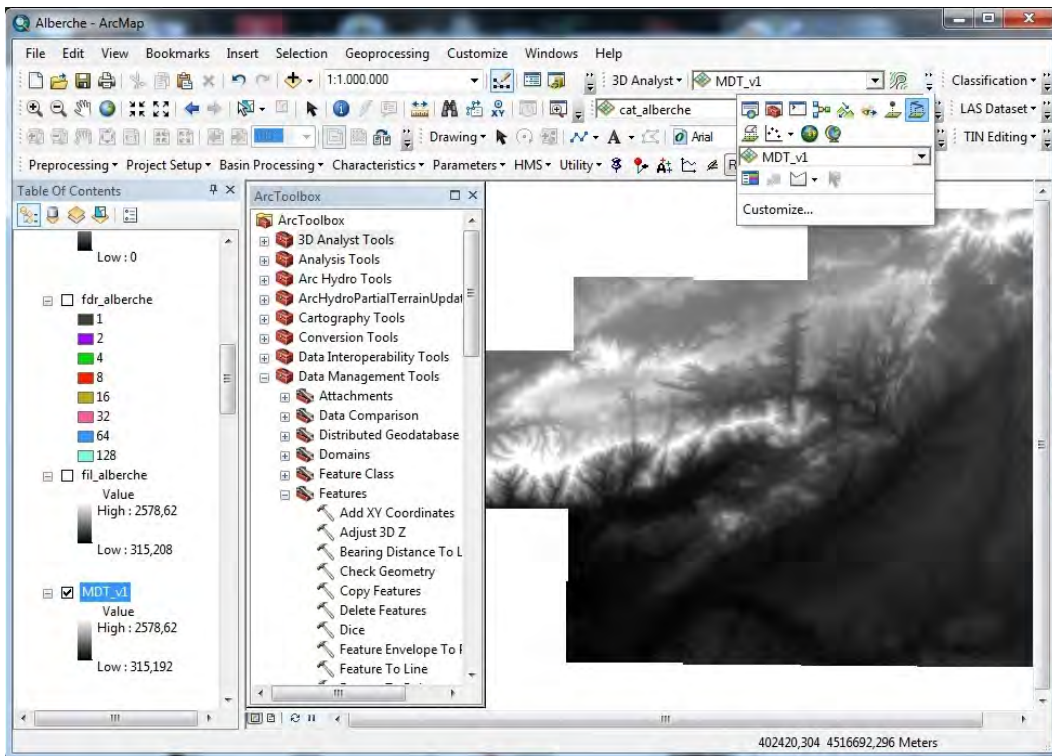
Según el método de tránsito de hidrogramas que vamos a utilizar (Muskingum - Cunge), cada tramo del cauce principal queda definido por su sección transversal característica, su pendiente, su longitud y la rugosidad del lecho (expresadas como el número n de Manning). Si bien la delimitación de cada tramo de cauce (*Reach*) puede observarse en los apartados correspondientes al modelo HEC-HMS, se ha creído conveniente explicar aquí la manera de obtener sus características mediante ArcGIS. En total se han definido ocho tramos de cauce, como se verá más adelante.

Paso 1. Definición de la sección transversal característica


En primer lugar seleccionamos la capa del Modelo Digital del Terreno (MDT_v1) dentro de *3D Analyst*.

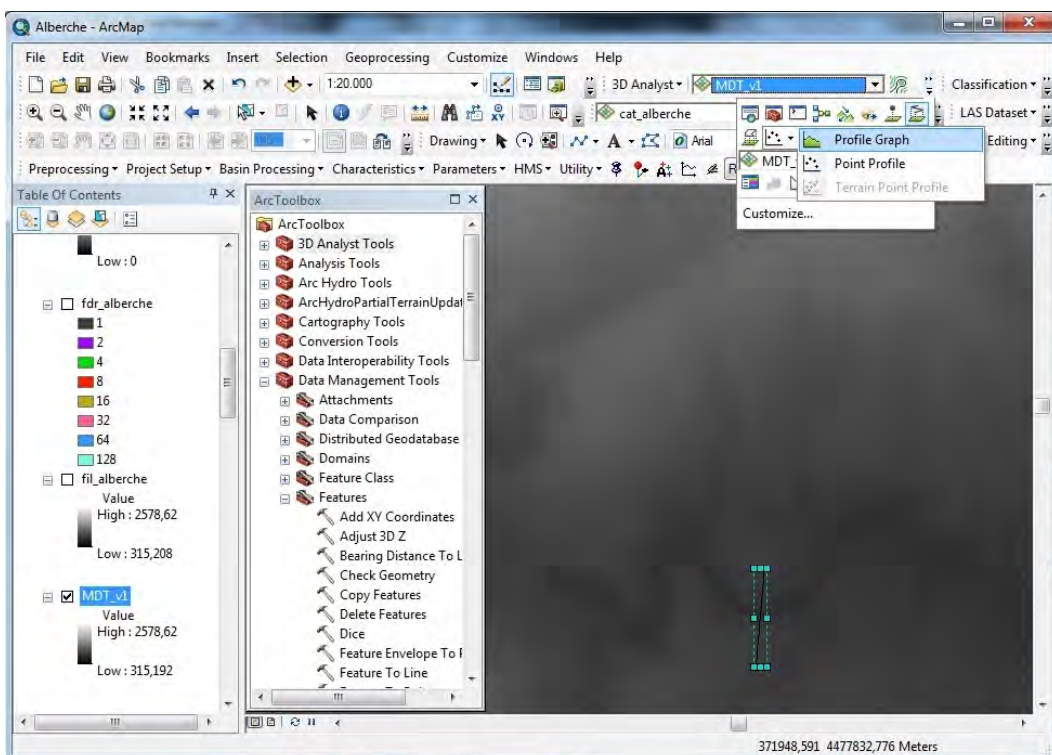


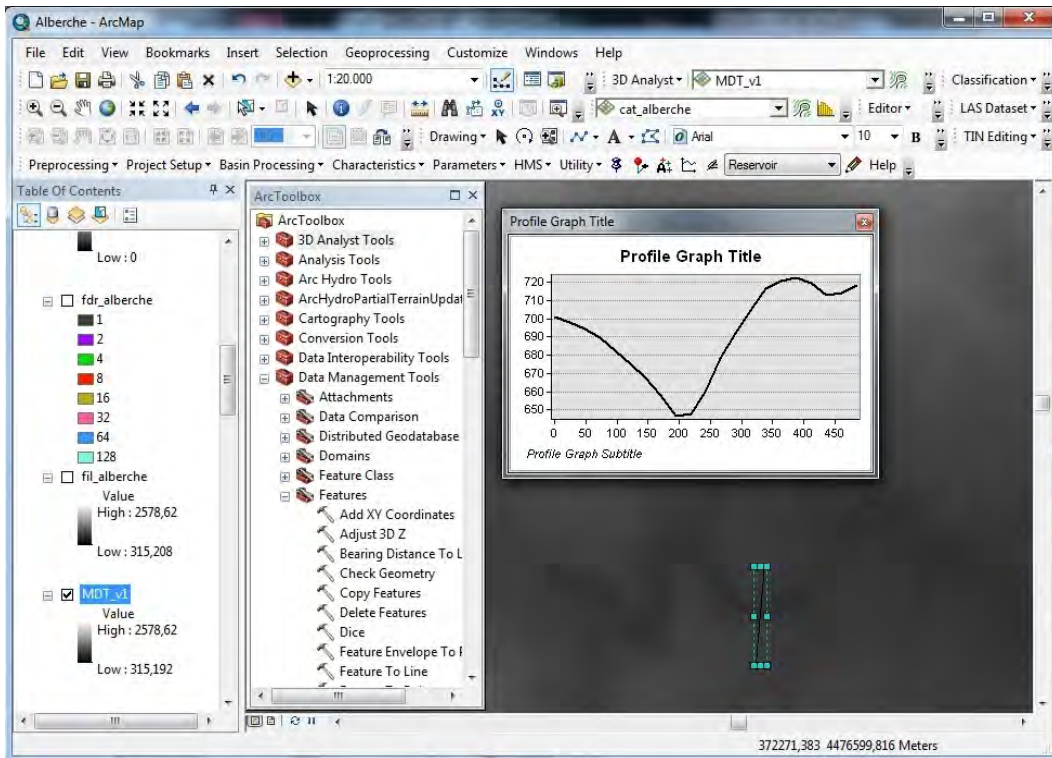
Marcamos la línea por la cual se trazará la sección transversal mediante la herramienta *Interpolate Line* , dentro de *3D Analyst*.



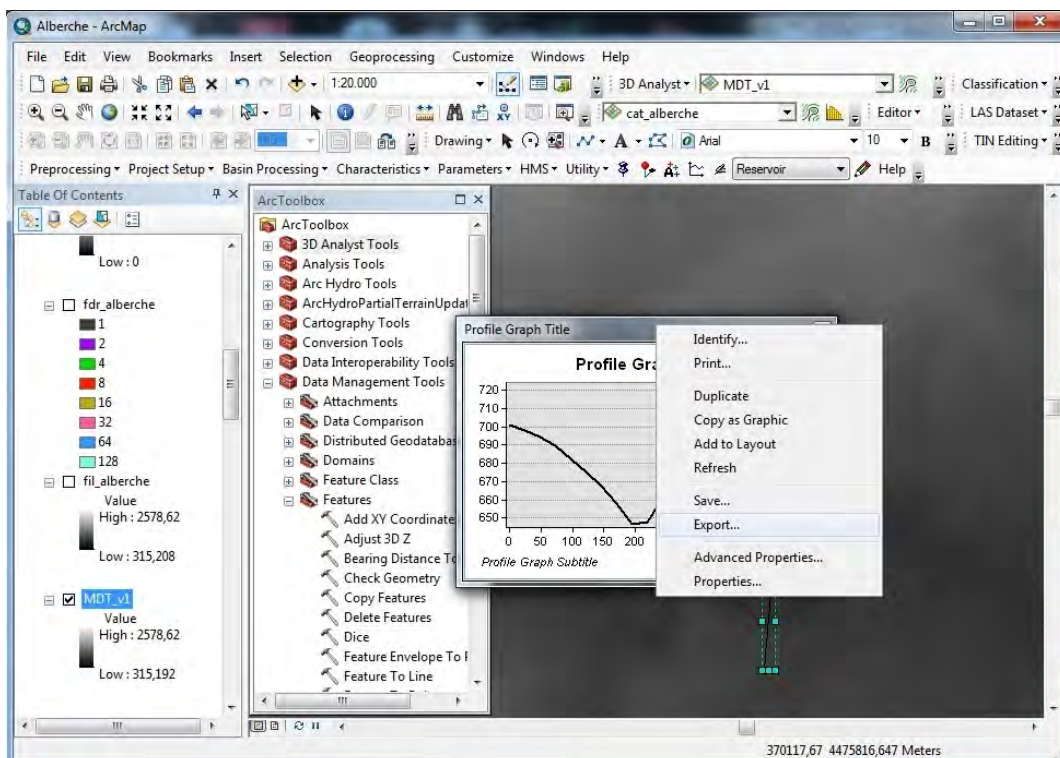
Para ello hacemos zoom sobre la zona en cuestión. Y para marcar el punto final es necesario hacer doble click.

Mediante la herramienta *Profile Graph* , dentro de *3D Analyst*, podemos observar el perfil generado.

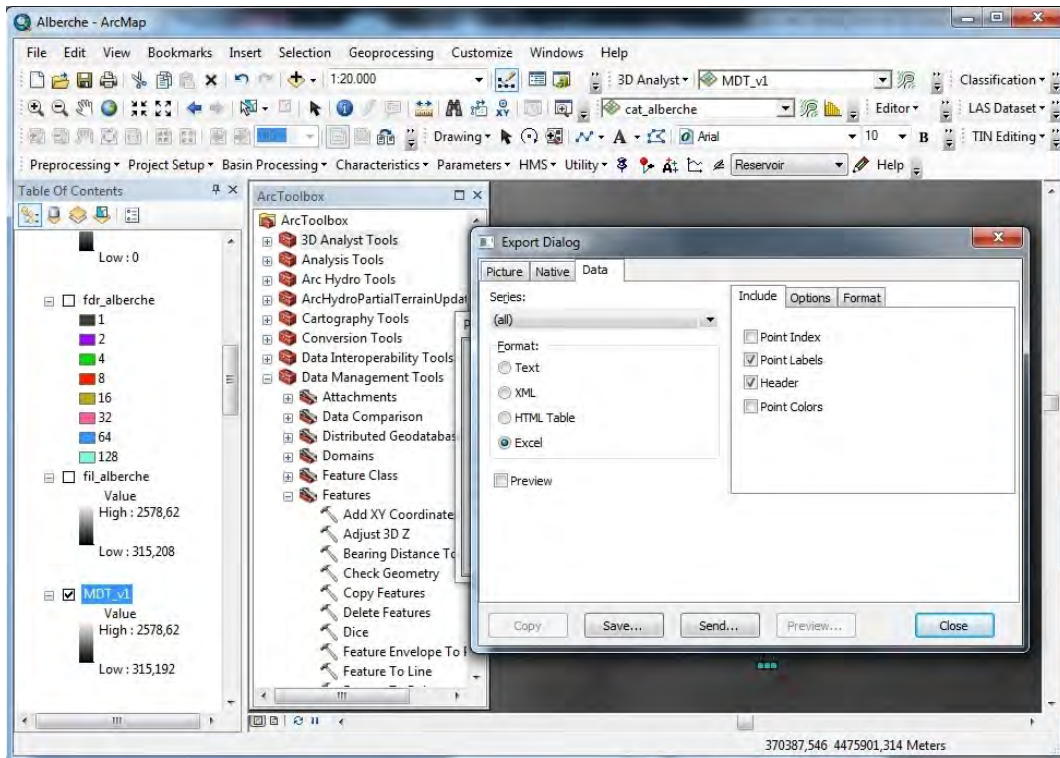




Pinchando con el botón derecho sobre el título del gráfico podemos exportar a Excel las coordenadas x, y de cada punto.




En la pestaña *Data* seleccionamos Excel y posteriormente la ruta donde se guardará el archivo.

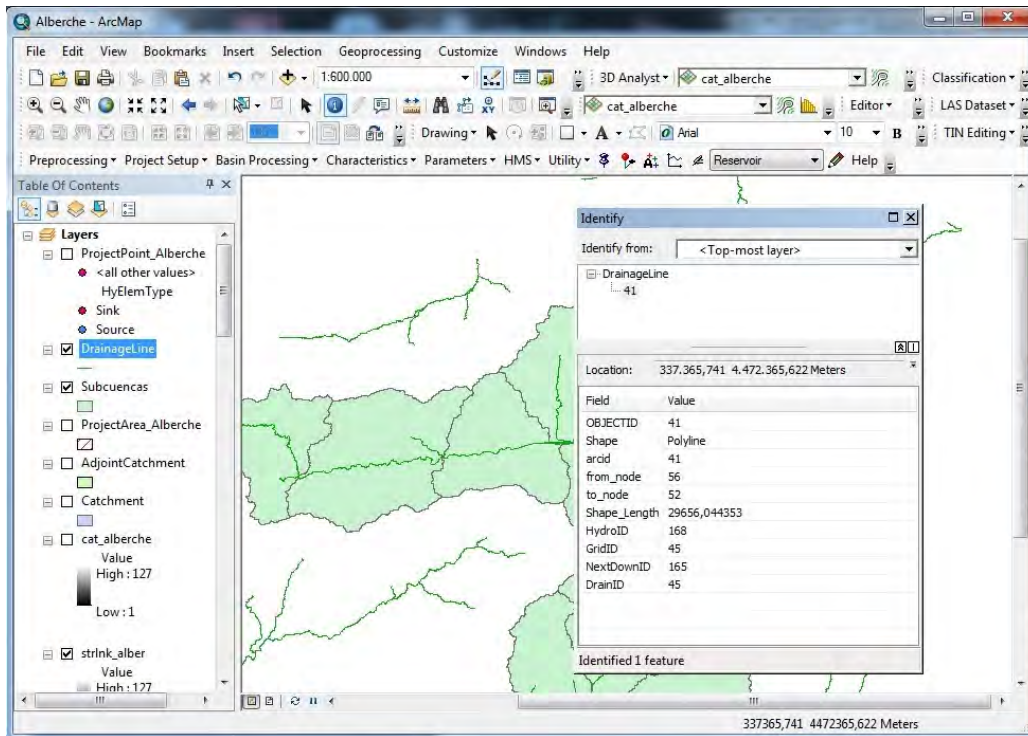


Del total de puntos que definen la sección tenemos que elegir solamente ocho, que son los que se introducirán en HEC-HMS. En el archivo Muskingum-Cunge.xlsx se encuentran los ocho puntos seleccionados para cada tramo, además del resto de características que definen cada sección y que se calculan en los siguientes pasos.

Paso 2. Cálculo de la longitud del tramo

La capa *DrainageLine* contiene pequeños segmentos de cauce, definidos entre dos puntos de incorporación de afluentes. Para conocer la longitud total de cada uno de nuestros tramos debemos sumar estos segmentos.


Para consultar la longitud de cada segmento utilizamos la herramienta *Identify*  y pinchamos sobre el tramo.

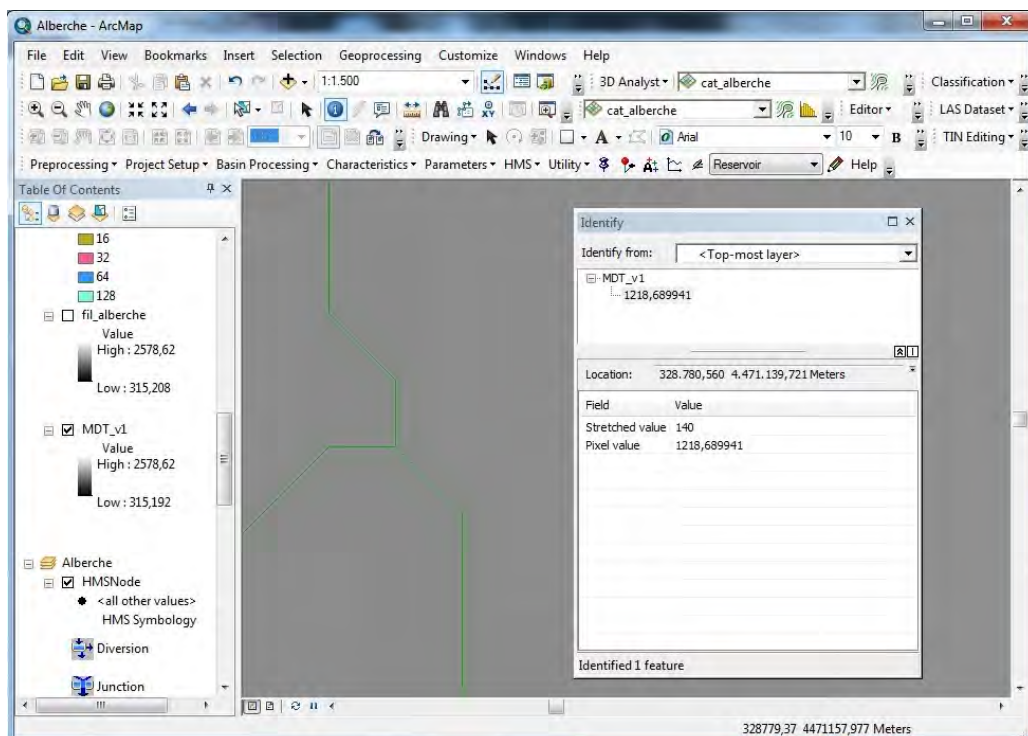


La longitud del segmento se encuentra en el campo *Shape_Length*. En el archivo Muskingum-Cunge.xlsx se encuentra la longitud de cada tramo, una vez sumados los diferentes segmentos.

Paso 3. Cálculo de la pendiente del tramo

Como ya hemos medido la longitud de cada tramo, sólo tenemos que calcular el desnivel del tramo para obtener la pendiente.

Para ello consultamos la cota del punto inicial y final con la herramienta *Identify*  en la capa del MDT (MDT_v1).



La cota de cada punto se encuentra en el campo *Pixel value*. En el archivo Muskingum-Cunge.xlsx se encuentran las cotas inicial y final y el cálculo de la pendiente para los ocho tramos.

Paso 4. Definición del número n de Manning

Para definir el coeficiente de rugosidad de cada tramo es importante conocer datos del cauce como su morfología y la presencia/ausencia de vegetación y/o piedras. Esta información puede obtenerse directamente realizando una visita de campo, aunque pueden hacerse estimaciones mediante la visualización de fotografías aéreas. En este estudio se han utilizado las tablas incluidas en el libro "Hidráulica de Canales Abiertos" (Chow, 1994).

Los coeficientes seleccionados para cada tramo, así como su justificación se encuentran en el archivo Muskingum-Cunge.xlsx.

6.7. Definición de los hietogramas

Debido a lo laborioso de la elaboración del estudio pluviométrico, para la realización de este ejercicio vamos a facilitar los hietogramas de diseño para cada subcuenca, si bien se indica a continuación un método para obtenerlos:

- 1 Búsqueda de las estaciones meteorológicas que existen dentro de la cuenca. Para ello utilizamos la página del SIGA (Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios): <http://sig.mapama.es/siga/>. Entre la información de partida se incluye un archivo shp con las estaciones existentes dentro de la cuenca (Estaciones_ETRS89).

- 2 Solicitud de los datos de Precipitación Máxima Diaria Mensual a la AEMET.

- 3 Análisis de la calidad de los datos. Para ello se utiliza el método de las dobles acumulaciones mediante el programa CHAC, programa gratuito creado por el CEDEX (2013). Con este análisis se descartan aquellas estaciones que no tengan una serie lo suficientemente larga (al menos 25 años consecutivos) o que tengan demasiadas ausencias de datos.

- 4 Completado de datos. Se rellenan las lagunas puntuales existentes en los datos recibidos, también mediante el programa CHAC, empleando el método de correlación múltiple.

- 5 Análisis estadístico de las precipitaciones. Se calculan las leyes de frecuencia de Gumbel, Normal, Log-Pearson III y GEV con CHAC. Como valor final se adopta la media aritmética entre las cuatro leyes.

- 6 Bondad de ajuste de las leyes de frecuencia. Se realiza el test de Kolmogorov-Smirnov para cada ley, considerando un grado de confiabilidad del 95 %. Este test se realiza con el software EASYFIT, despreciando aquellas leyes que no pasen el test.

- 7 Distribución espacial de precipitaciones. Mediante ArcGIS se aplica el método de los polígonos de Thiessen, ponderando las precipitaciones en función del área de influencia de cada estación.

- 8 Distribución temporal de precipitaciones. Consiste en determinar el hietograma de diseño para cada subcuenca. Se aplica el método de los bloques alternos, para lo cual es necesario elaborar las curvas IDF, con el apoyo de la fórmula que establece la Instrucción 5.2-IC de Drenaje Superficial de Carreteras para el cálculo de intensidades de lluvia.

Los hietogramas de cada subcuenca se facilitan entre los datos de partida, en el archivo Hietogramas.xlsx.

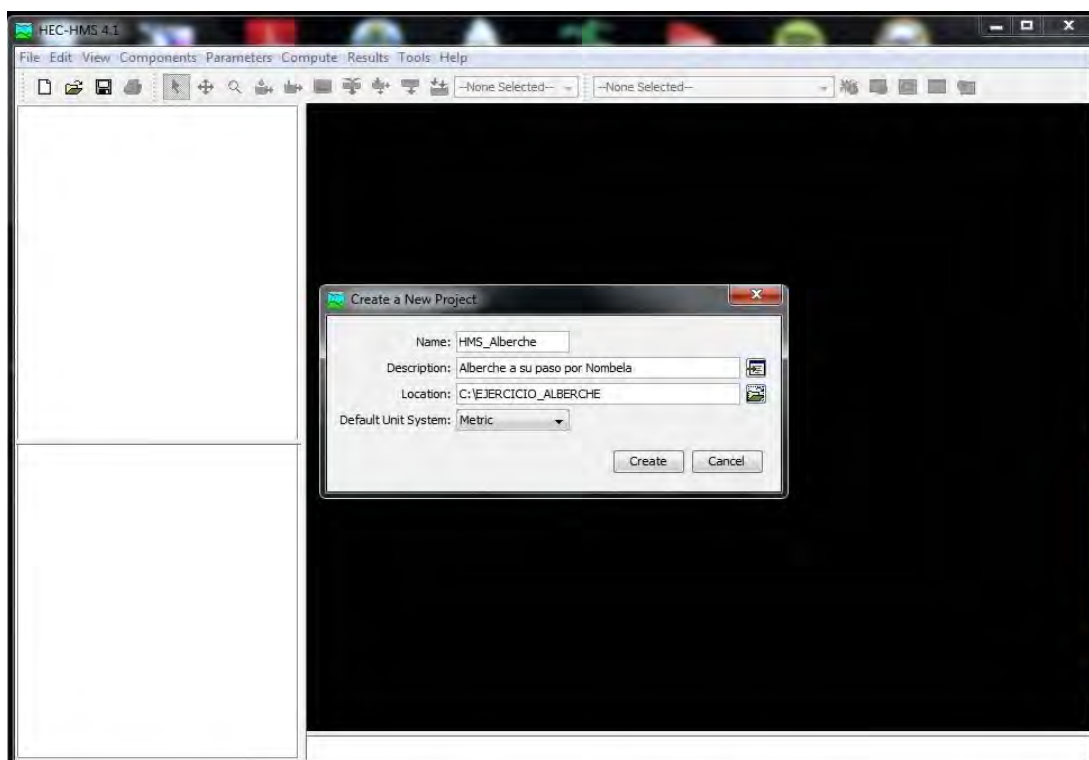
7. Elaboración del modelo HEC-HMS

7.1. Creación del modelo HEC-HMS

Paso 1. Creación del archivo HEC-HMS

Abrimos HEC-HMS y creamos un proyecto nuevo.

File → New...



En *Name* damos un nombre al proyecto (HMS_Alberche).

En *Description* escribimos una pequeña descripción del proyecto.

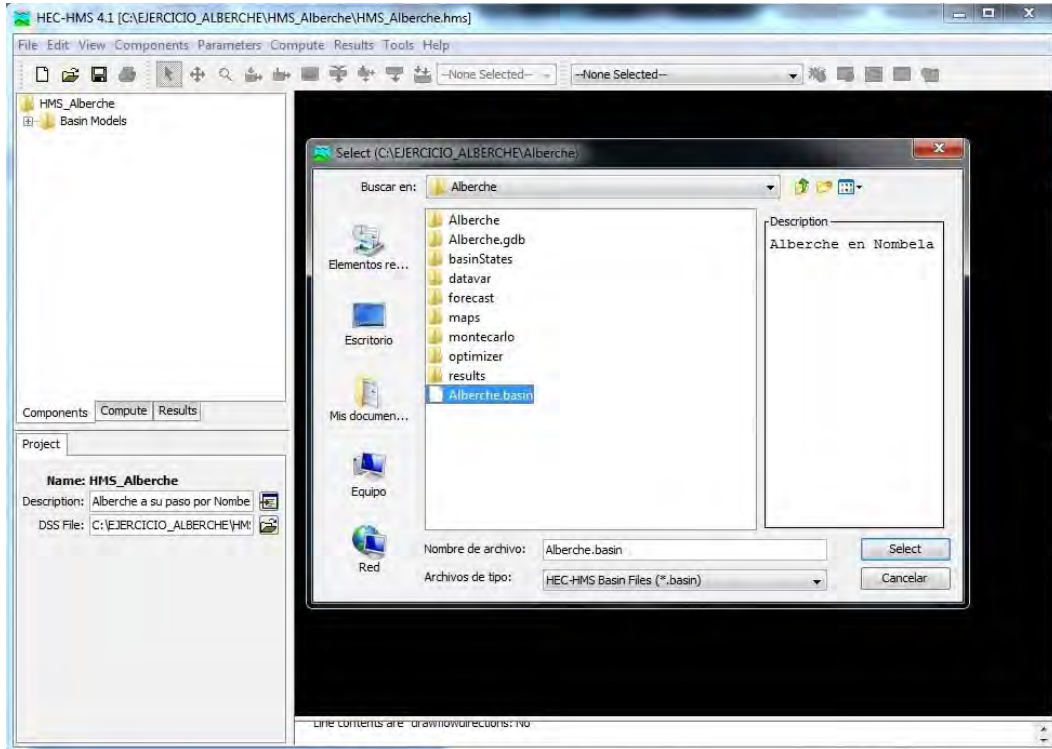
En *Location* buscamos la carpeta donde queremos guardar el proyecto (EJERCICIO_ALBERCHE).

En *Default Unit System* seleccionamos el sistema de unidades (*Metric*).

Paso 2. Importación de los datos generados en HEC-GeoHMS

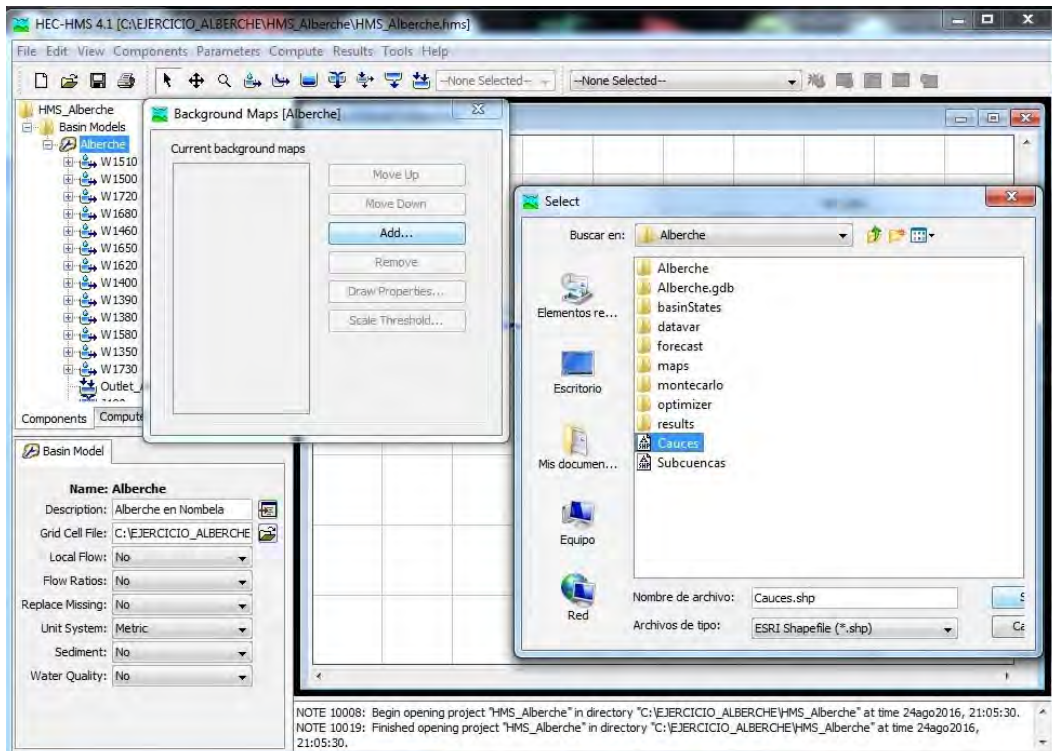
Buscamos el modelo de cuenca generado en HEC-GeoHMS (C:\EJERCICIO_ALBERCHE\Alberche).

File → Import → Basin Model...



Paso 3. Carga del mapa de fondo

View → Background Maps → Add

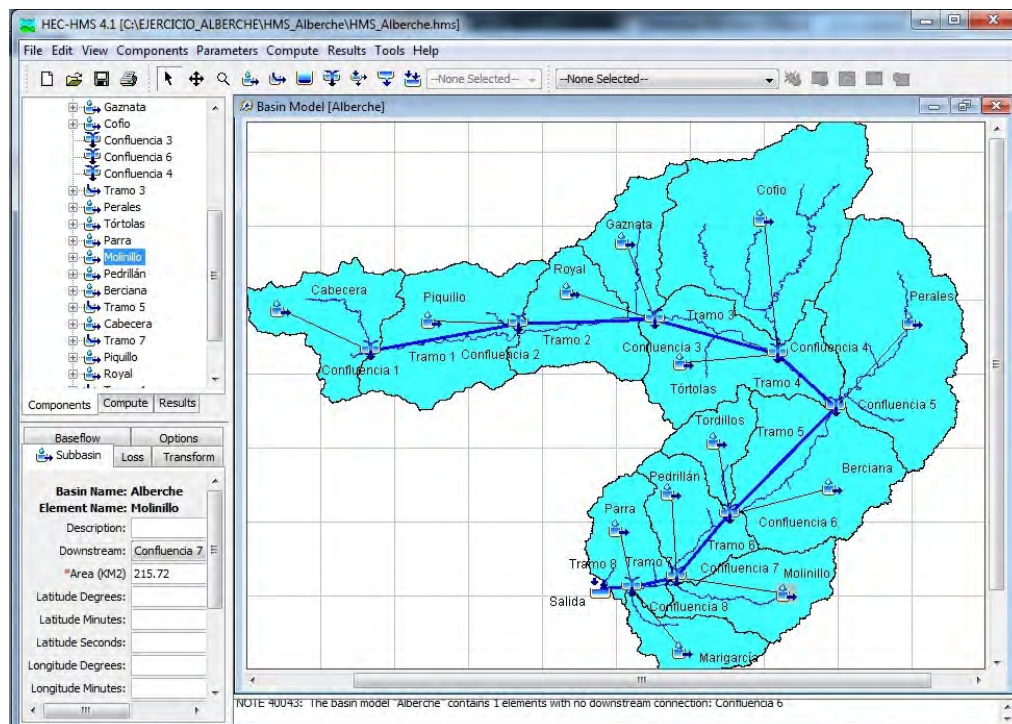


Buscamos las capas shp de Subcuencas y Cauces generadas con HEC-GeoHMS (C:\EJERCICIO_ALBERCHE\Alberche).

Paso 4. Simplificación del modelo

Hec-GeoHMS ha creado un total de 15 tramos de cauce, pero para simplificar el ejercicio nos vamos a quedar sólo con 8. Es importante que al eliminar cada tramo definamos la conexión al modelo por la parte de aguas abajo. Para ello pinchamos sobre el tramo que ha quedado desconectado y en la pestaña *Reach* seleccionamos la unión en *Downstream*. Lo mismo sucede con las subcuencas, que al eliminar elementos debe comprobarse su conexión aguas abajo.

También vamos a modificar los nombres de los tramos de cauce y las uniones dando valores de 1 a 8 de aguas arriba a aguas abajo. El esquema final queda de la siguiente manera:



7.2. Modelo de cuenca (Basin Model)

7.2.1. Caracterización de las subcuencas

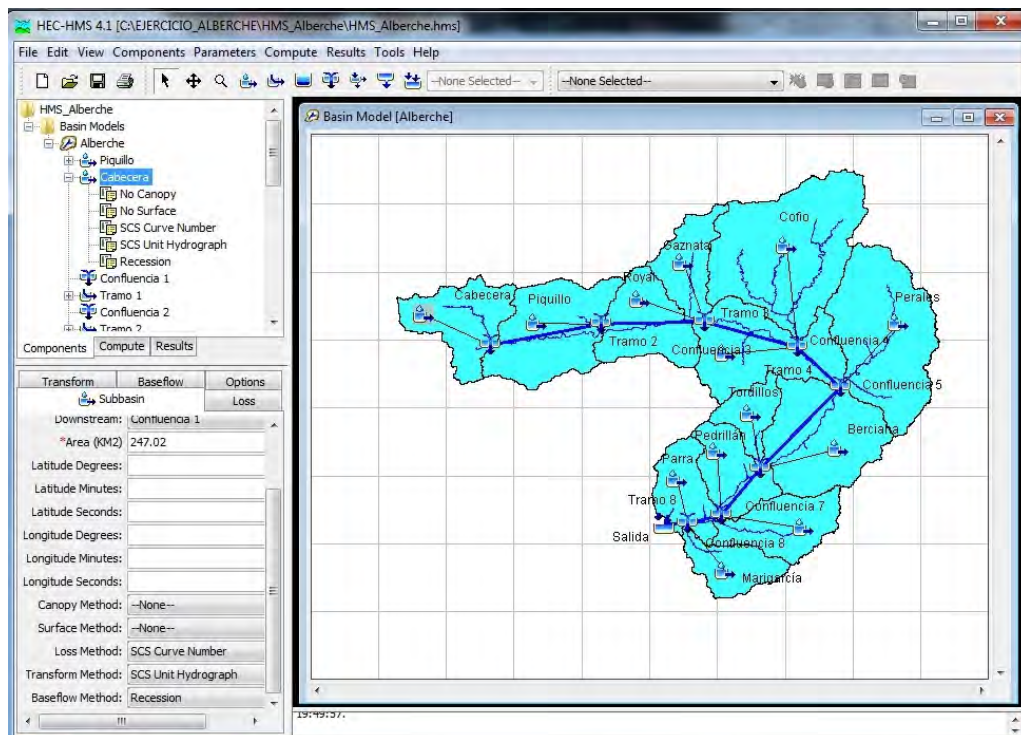
A continuación se incluye la caracterización de la subcuenca Cabecera. El mismo proceso debe repetirse para las otras doce subcuencas.

Paso 1. Completado de la pestaña Subbasin

Como se ha comentado anteriormente, en la pestaña *Subbasin* seleccionamos los métodos de cálculo y otros valores de cada subcuenca:

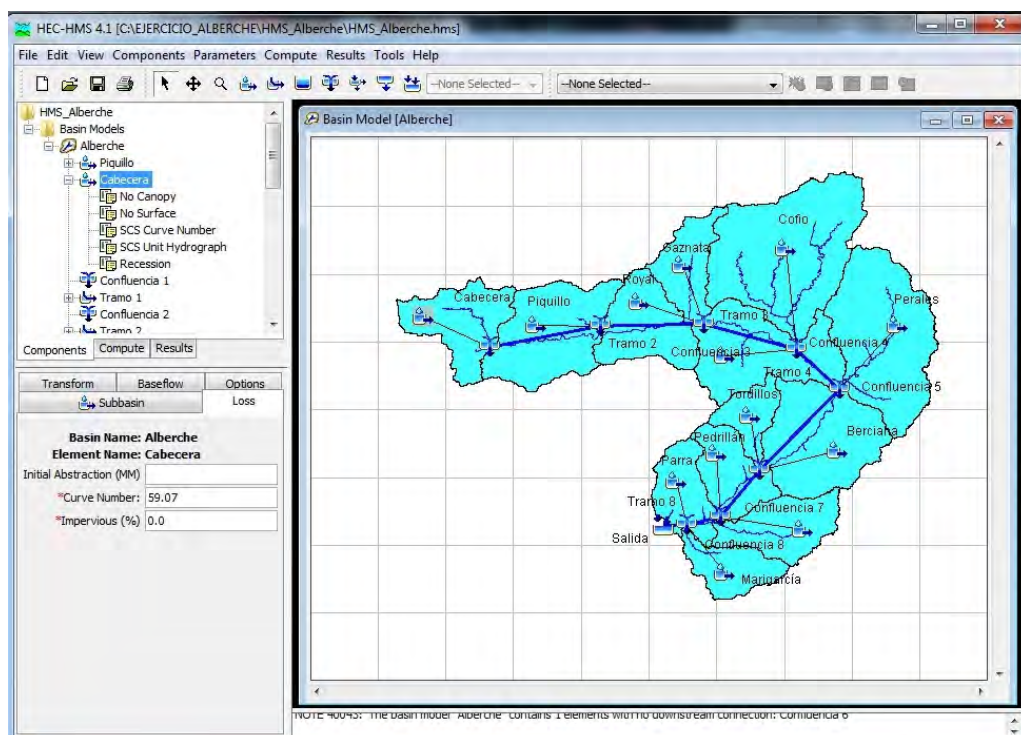
- ✓ *Area (KM2)*: superficie de la cuenca en km².
- ✓ *Latitude Degrees*, *Latitude Minutes*, *Latitude Seconds*, *Longitude Degrees*, *Longitude Minutes*, *Longitude Seconds*: lo dejamos en blanco.
- ✓ *Canopy Method*: --None--.
- ✓ *Surface Method*: --None--.
- ✓ *Loss Method*: SCS Curve Number.

- ✓ Transform Method: SCS Unit Hydrograph.
- ✓ Baseflow Method: Recession.



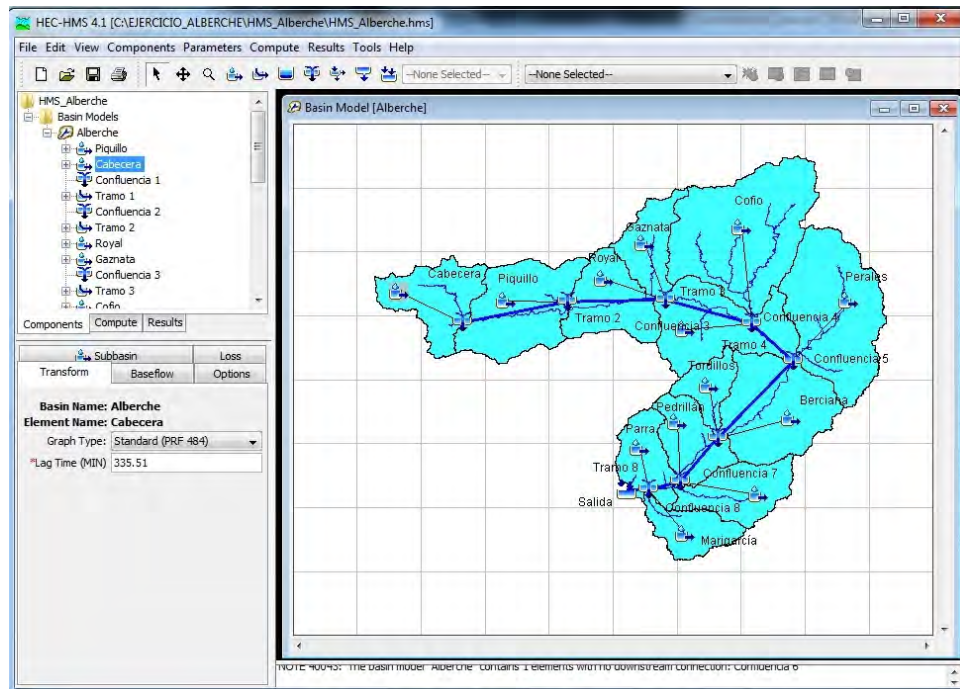
Paso 2. Completado de la pestaña Loss

- ✓ Initial Abstraction (MM): dejamos la casilla en blanco.
- ✓ Curve Number: número de curva previamente calculado.
- ✓ Impervious (%): porcentaje de la cuenca que es impermeable. Como la impermeabilidad de la cuenca se tiene en cuenta dentro del valor del número de curva, ponemos un 0.0 %.



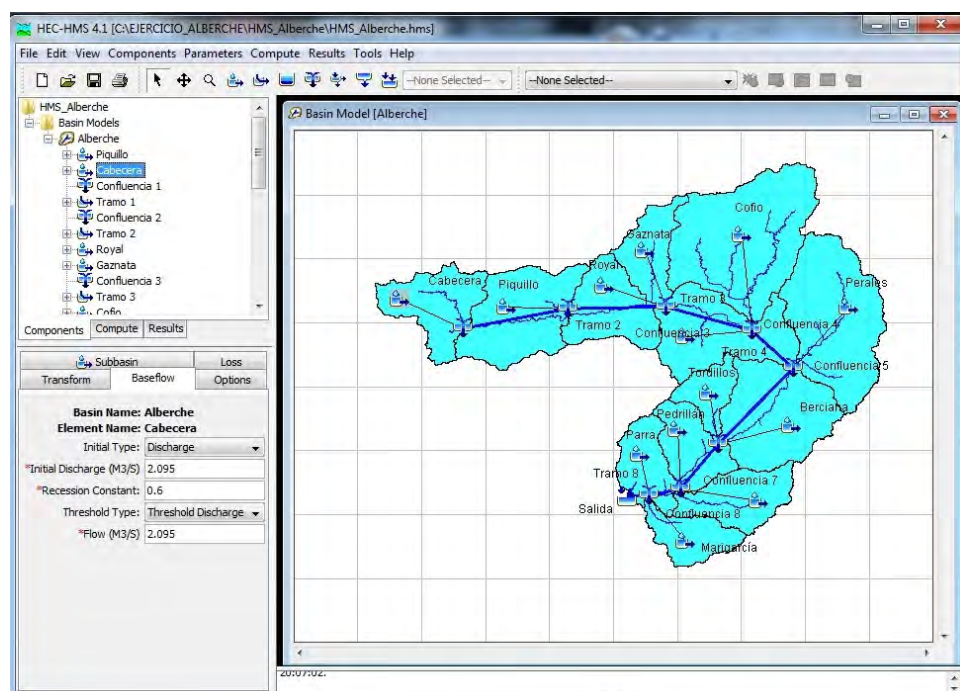
Paso 3. Completado de la pestaña Transform

- ✓ *Graph Type*: seleccionamos *Standard (PRF-484)*.
- ✓ *Lag Time (MIN)*: tiempo de retardo previamente calculado.



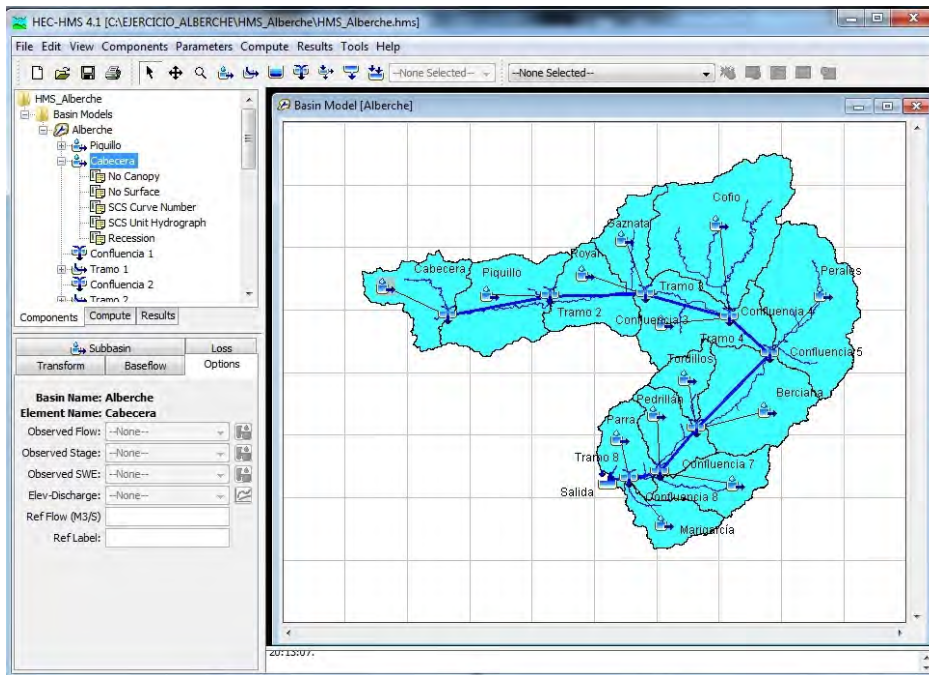
Paso 4. Completado de la pestaña Baseflow

- ✓ *Initial Type*: seleccionamos *Discharge*.
- ✓ *Initial Discharge (M3/S)*: flujo base previamente calculado.
- ✓ *Recession Constant*: suele utilizarse un valor de 0.6.
- ✓ *Threshold Type*: seleccionamos *Threshold Discharge*.
- ✓ *Flow (M3/S)*: volvemos a introducir el flujo base.



Paso 5. Completado de la pestaña Options

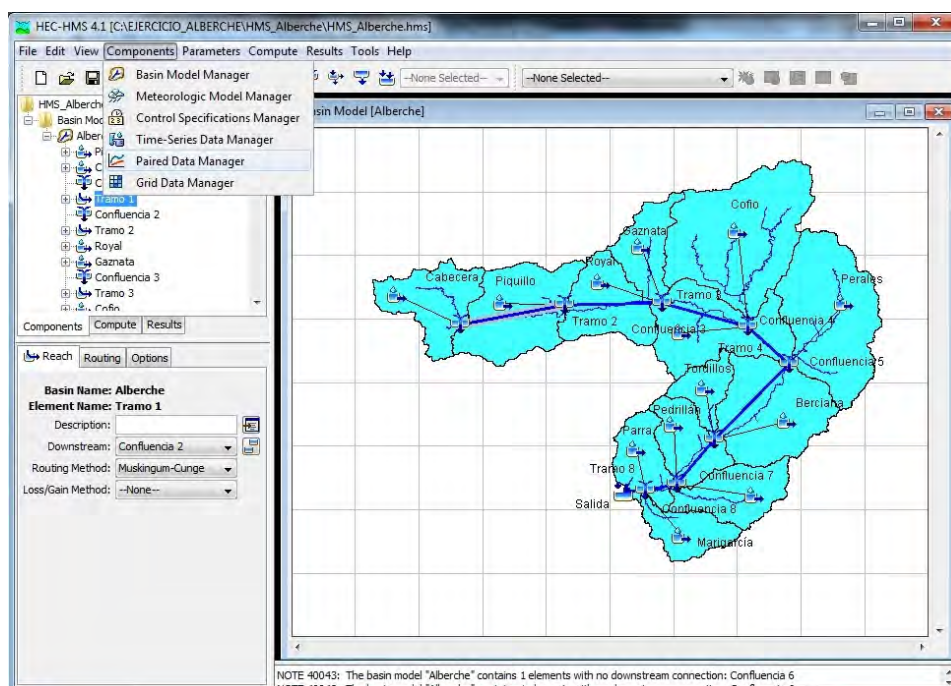
- ✓ Observed Flow: --None--.
- ✓ Observed Stage: --None--.
- ✓ Observed SWE: --None--.
- ✓ Elev-Discharge: --None--.
- ✓ Ref Flow (M3/S): lo dejamos en blanco.
- ✓ Ref Label: lo dejamos en blanco.



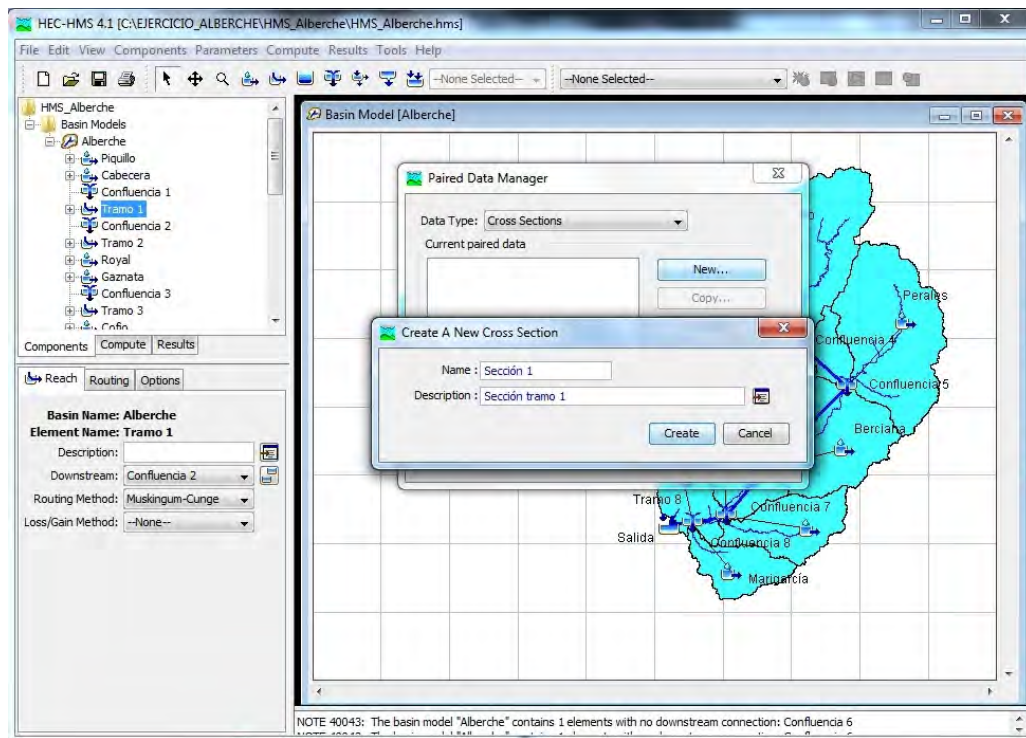
7.2.2. Caracterización de los tramos

Paso 1. Definición de las secciones transversales

Components → Paired Data Manager



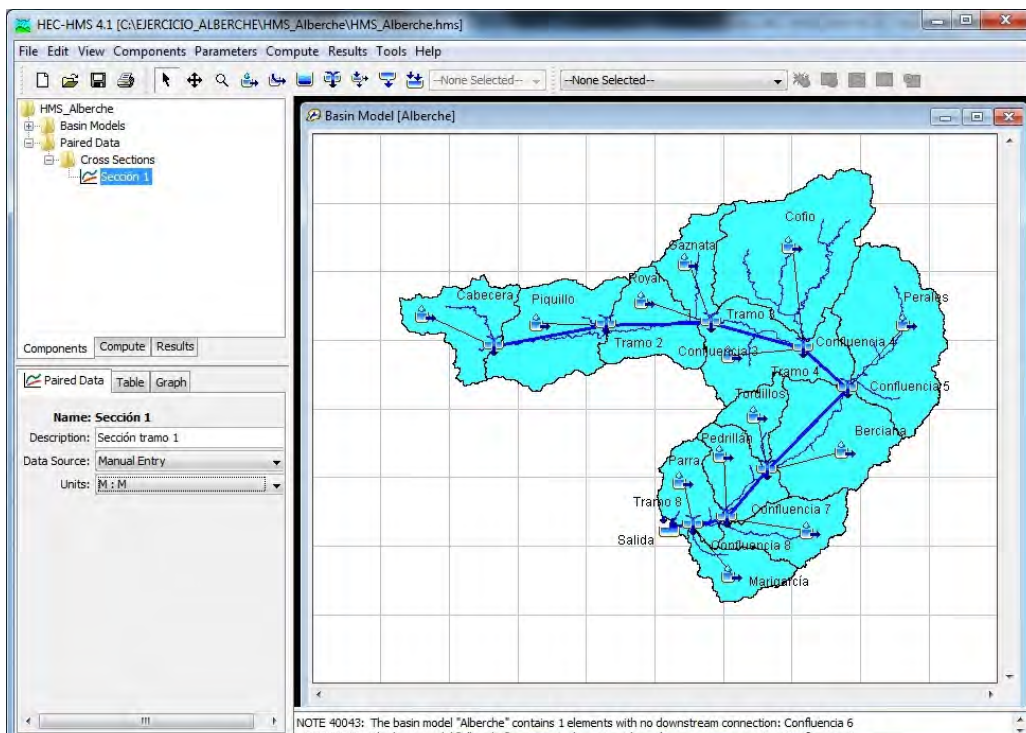
En *Data Type* seleccionamos *Cross Sections*. Y pinchando en *New* damos nombre a la sección.



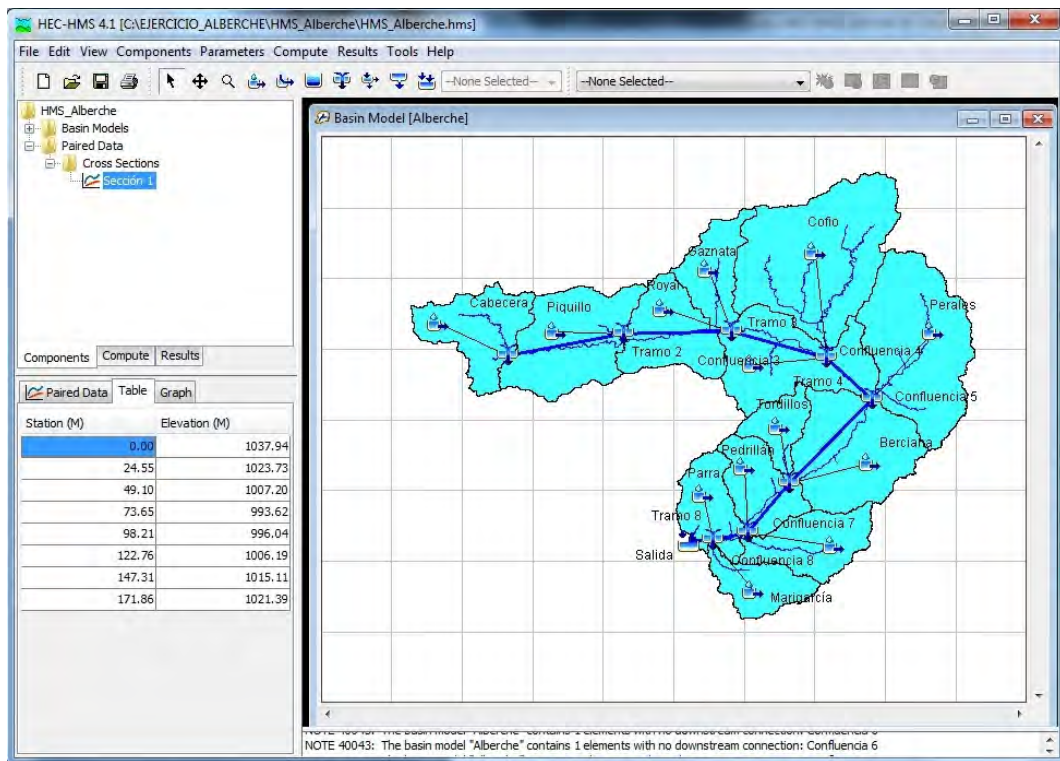
Al crear la sección, en la parte izquierda de la pantalla, se genera la carpeta *Paired Data*. Y dentro de ésta, la subcarpeta *Cross Sections*.

En la pestaña *Paired Data* se define:

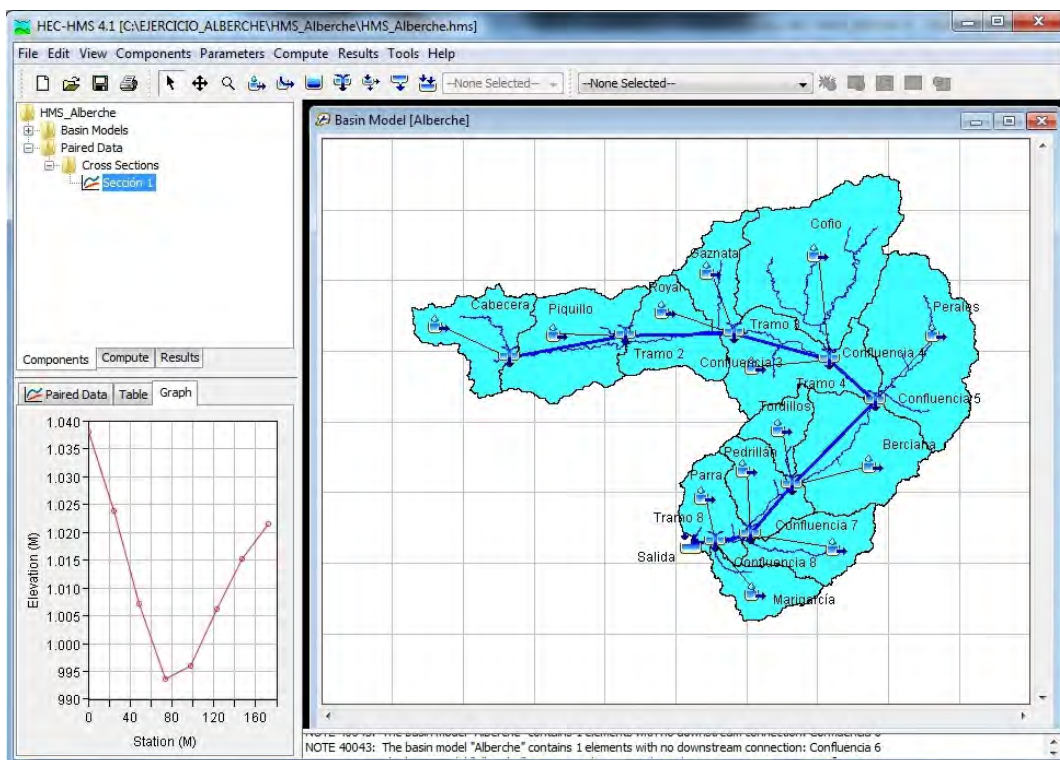
- ✓ *Description*: es la descripción que se ha dado al generar la sección.
- ✓ *Data Source*: seleccionamos *Manual Entry*.
- ✓ *Units*: seleccionamos las unidades de medida (M:M).



En la pestaña *Table* se introducen los 8 puntos que definen la sección transversal. Estos datos se encuentran dentro del archivo Muskingum-Cunge.xlsx.



En la pestaña *Graph* se puede observar gráficamente la sección transversal definida.

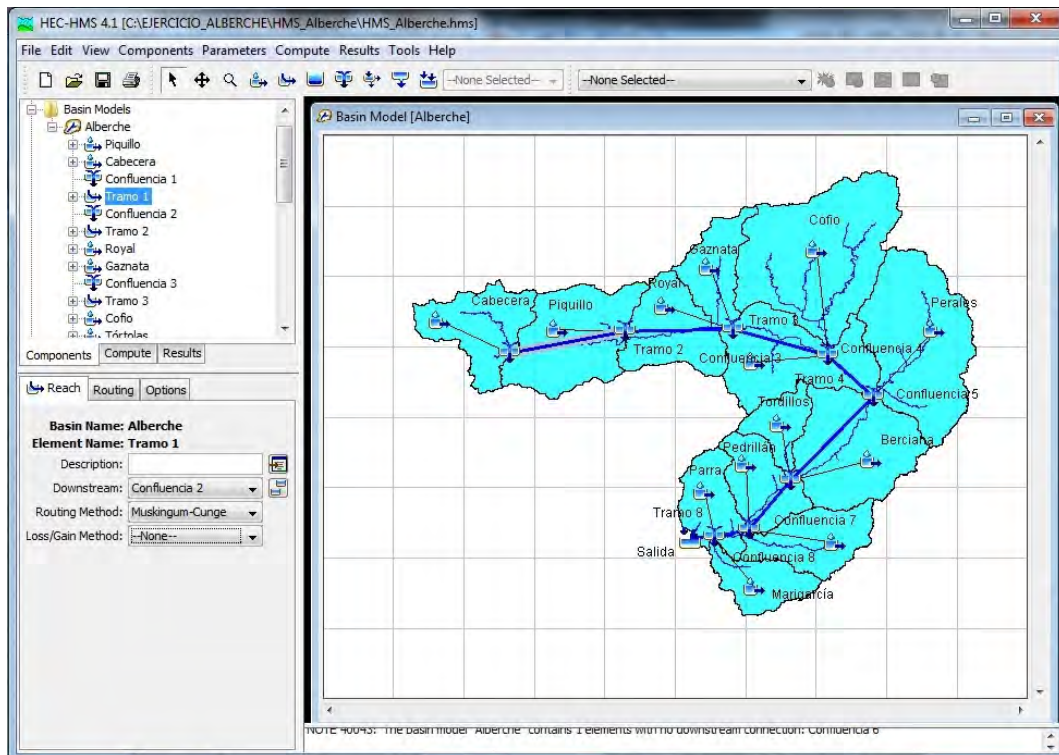


El proceso se repite para las ocho secciones transversales, una para cada tramo.

Paso 2. Completado de la pestaña Reach

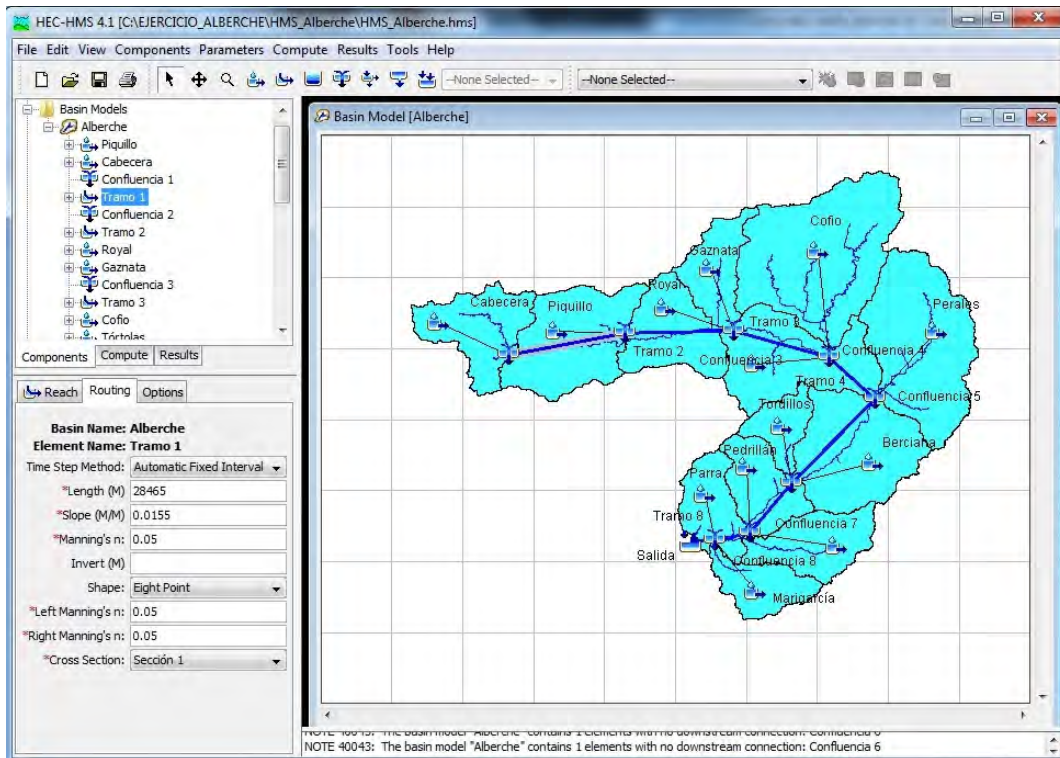
Se selecciona cada uno de los tramos y se definen sus características.

- ✓ *Description*: descripción del tramo.
- ✓ *Downstream*: indica el nodo de conexión aguas abajo. Como el modelo ya está generado, no es necesario modificar este campo.
- ✓ *Routing Method*: seleccionamos *Muskingum-Cunge*.
- ✓ *Loss/Gain Method*: --None--.



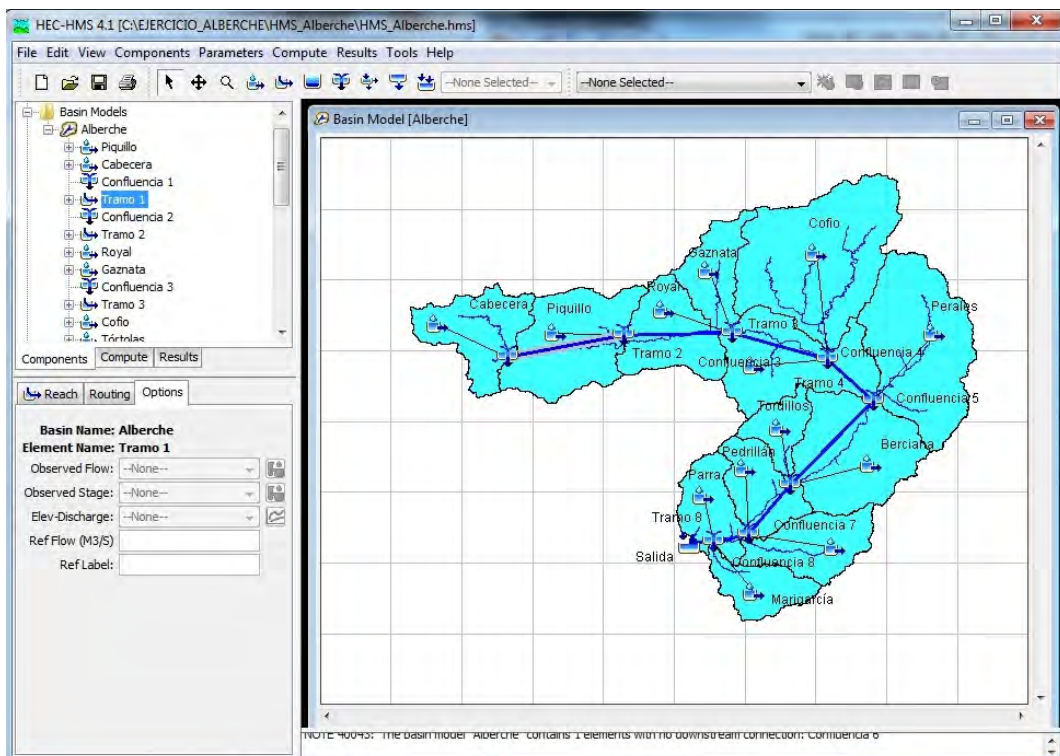
Paso 3. Completado de la pestaña Routing

- ✓ *Time Step Method*: seleccionamos *Automatic Fixed Interval*.
- ✓ *Length (M)*: longitud del tramo. Se obtiene del archivo Muskingum-Cunge.xlsx.
- ✓ *Slope (M/M)*: pendiente del tramo. Se obtiene del archivo Muskingum-Cunge.xlsx.
- ✓ *Manning's n*: coeficiente de rugosidad de Manning. Se obtiene del archivo Muskingum-Cunge.xlsx.
- ✓ *Invert (M)*: es la cota. Lo dejamos en blanco.
- ✓ *Shape*: seleccionamos *Eight Point*.
- ✓ *Left Manning's n*: coeficiente de rugosidad de Manning de la margen izquierda. Consideramos el mismo valor que en el cauce.
- ✓ *Right Manning's n*: coeficiente de rugosidad de Manning de la margen derecha. Consideramos el mismo valor que en el cauce.
- ✓ *Cross Section*: seleccionamos la sección transversal previamente generada.



Paso 4. Completado de la pestaña Options

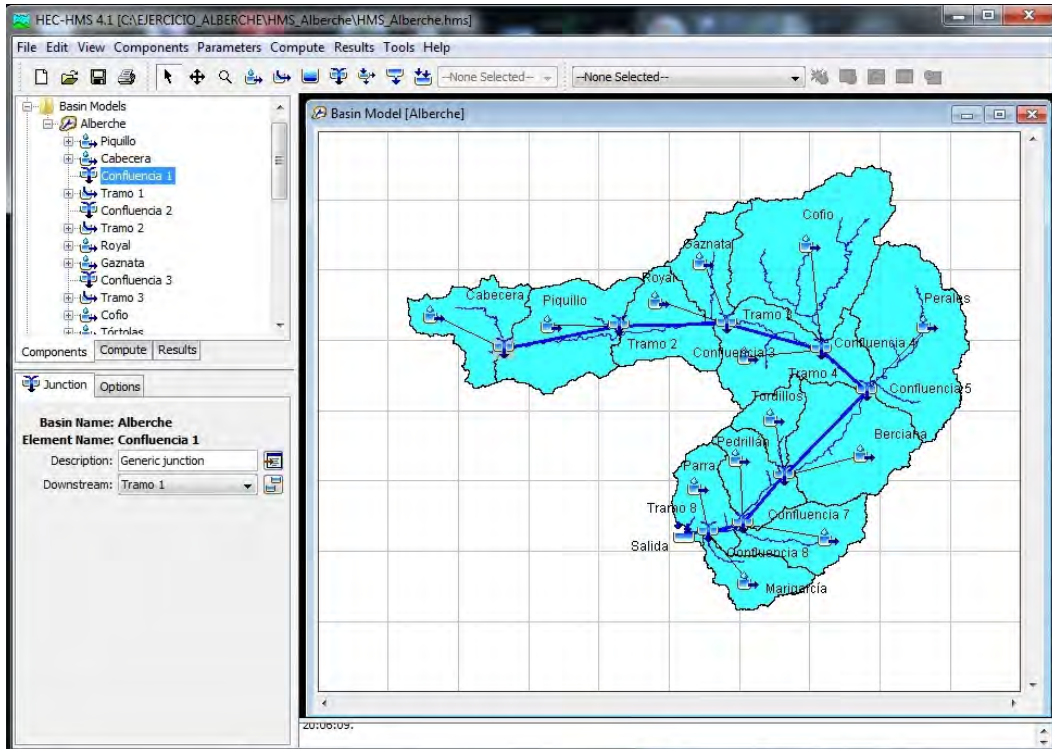
- ✓ *Observed Flow:* --None--.
- ✓ *Observed Stage:* --None--.
- ✓ *Elev-Discharge:* --None--.
- ✓ *Ref Flow (M3/S):* lo dejamos en blanco.
- ✓ *Ref Label:* lo dejamos en blanco.



7.2.3. Caracterización de las confluencias

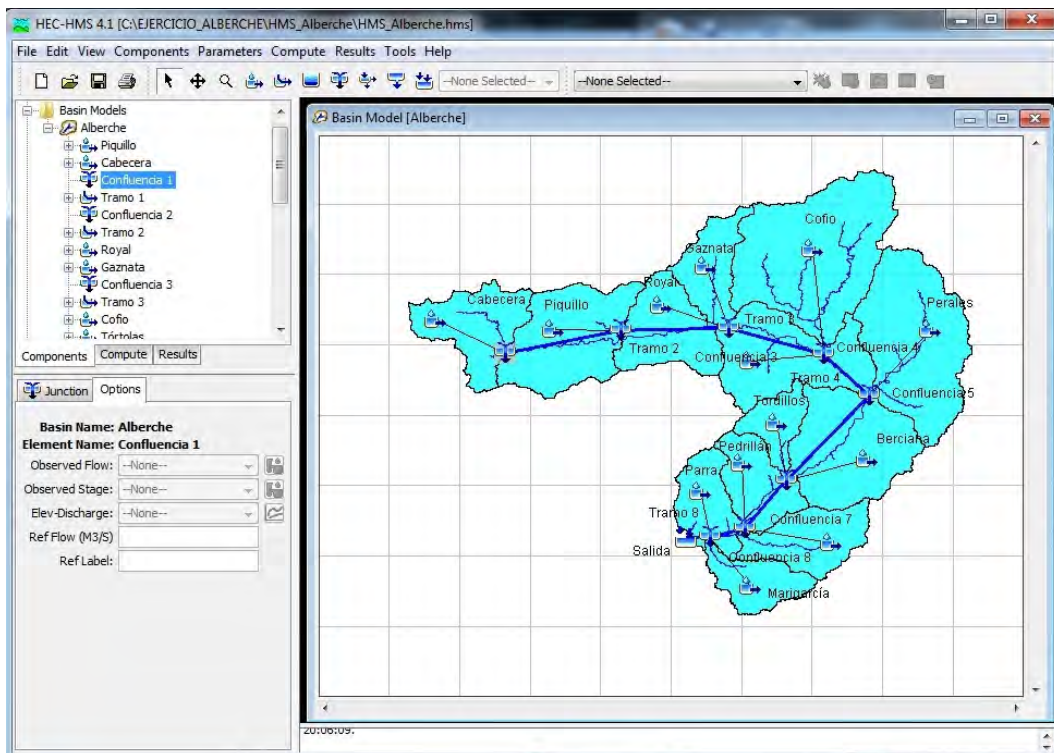
Paso 1. Completado de la pestaña Junction

- ✓ *Description*: descripción del elemento.
- ✓ *Downstream*: indica el nodo de conexión aguas abajo. Como el modelo ya está generado, no es necesario modificar este campo.



Paso 2. Completado de la pestaña Options

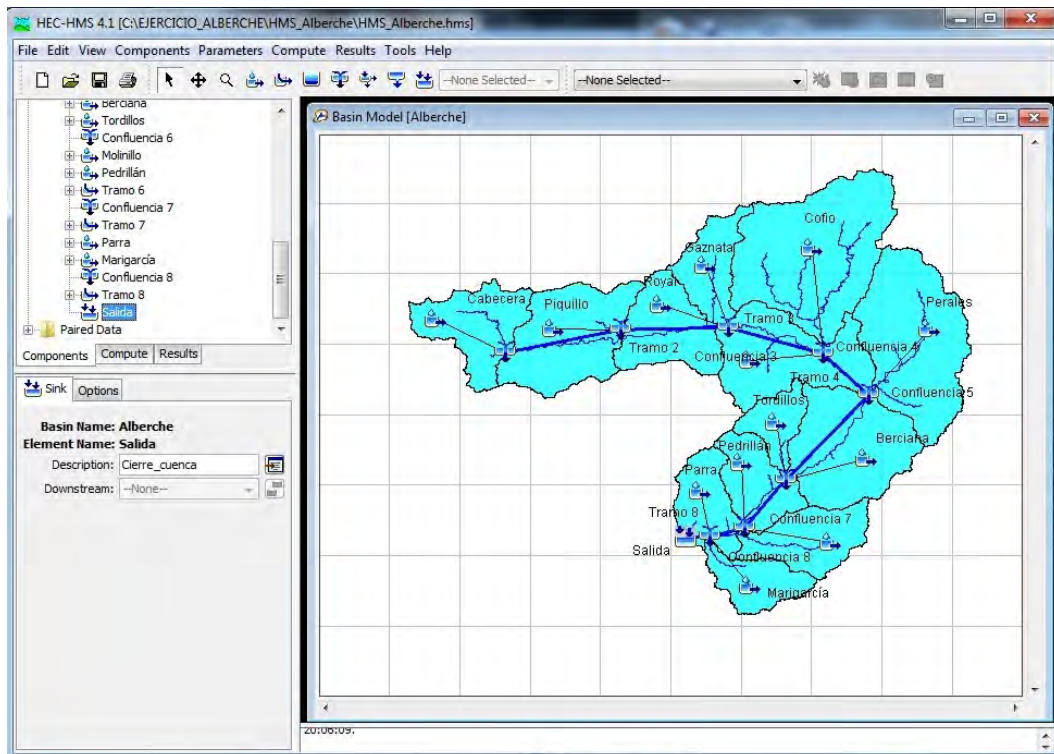
- ✓ *Observed Flow*: --None--.
- ✓ *Observed Stage*: --None--.
- ✓ *Elev-Discharge*: --None--.
- ✓ *Ref Flow (M3/S)*: lo dejamos en blanco.
- ✓ *Ref Label*: lo dejamos en blanco.



7.2.4. Caracterización de la salida

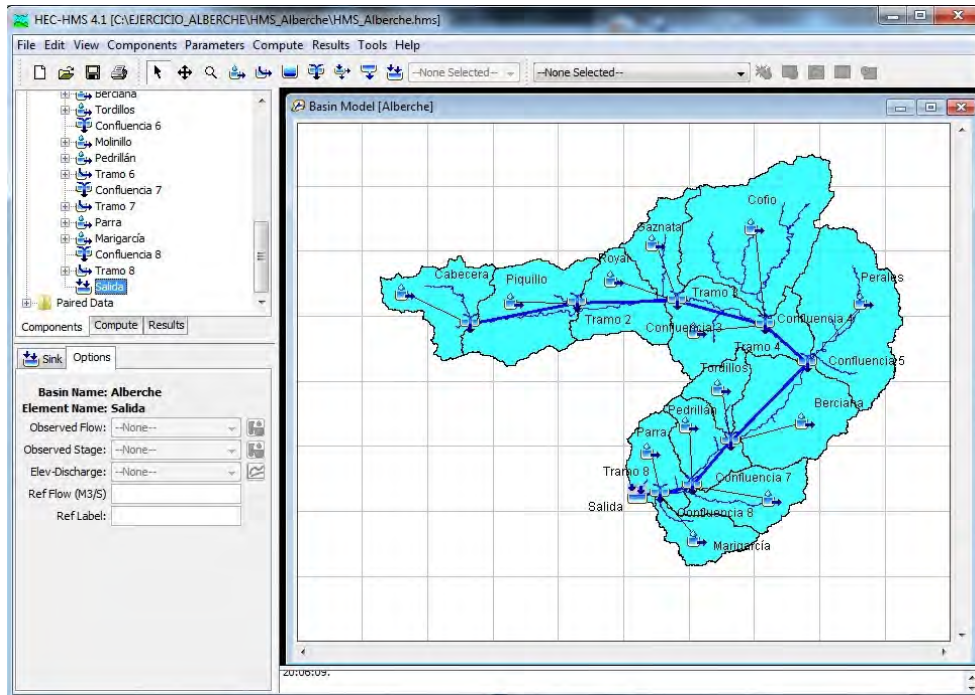
Paso 1. Completado de la pestaña Sink

- ✓ *Description:* descripción del elemento.
- ✓ *Downstream:* como se trata del nodo de salida, no hay más elementos aguas abajo, por lo que seleccionamos --None--.



Paso 2. Completado de la pestaña Options

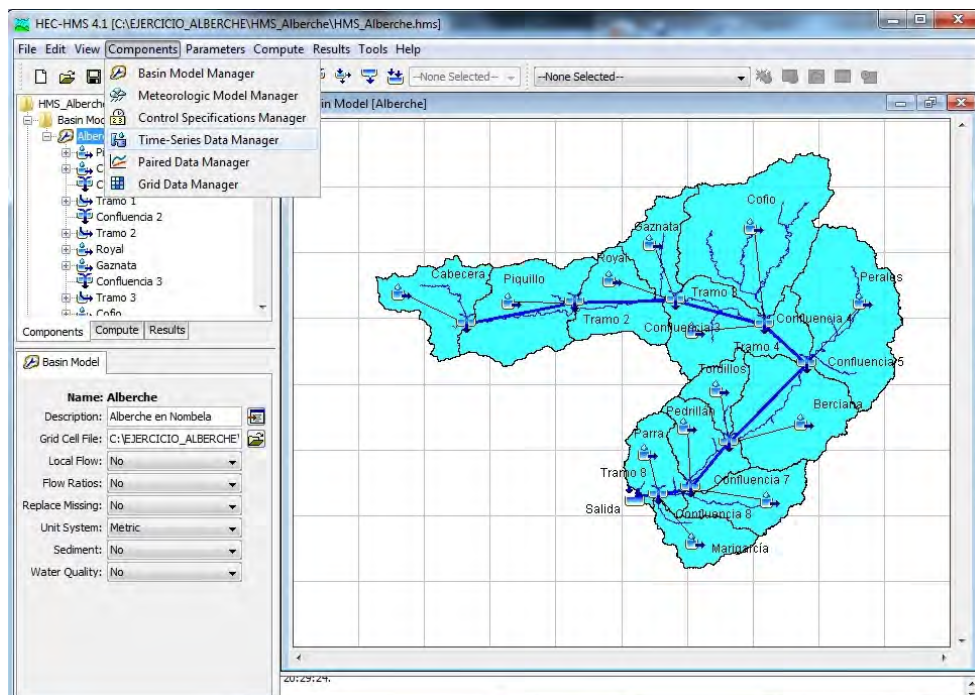
- ✓ Observed Flow: --None--.
- ✓ Observed Stage: --None--.
- ✓ Elev-Discharge: --None--.
- ✓ Ref Flow (M3/S): lo dejamos en blanco.
- ✓ Ref Label: lo dejamos en blanco.



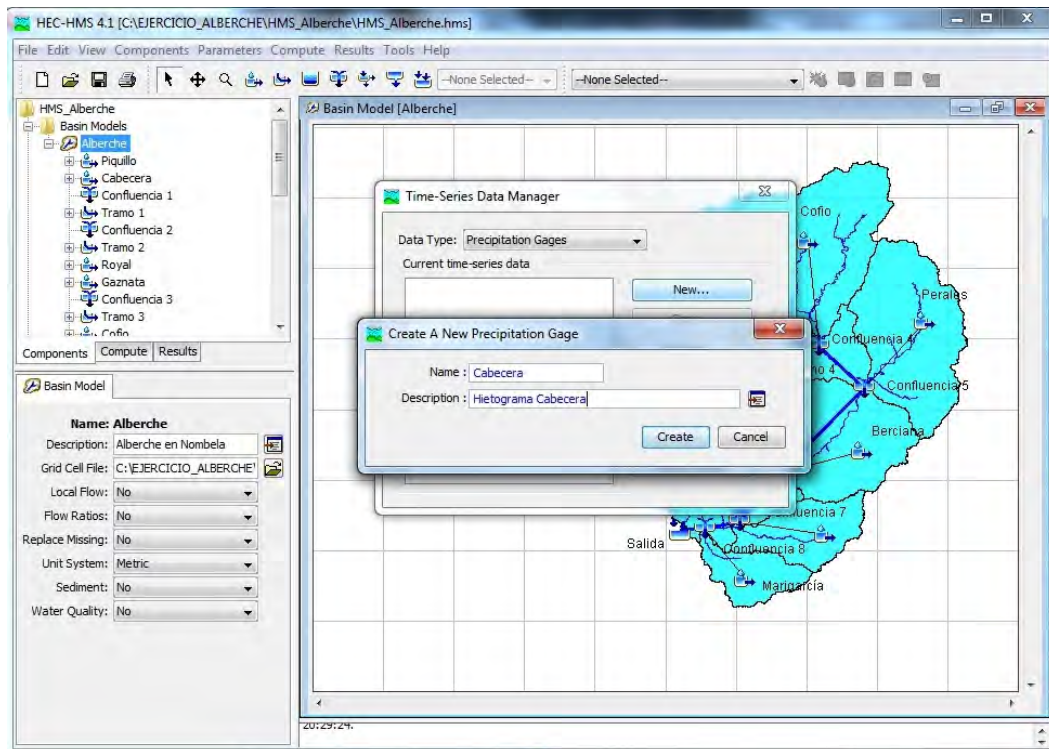
7.3. Modelo meteorológico (Meteorologic Model)

Paso 1. Creación de los hietogramas de diseño

Components → *Time-Series Data Manager*



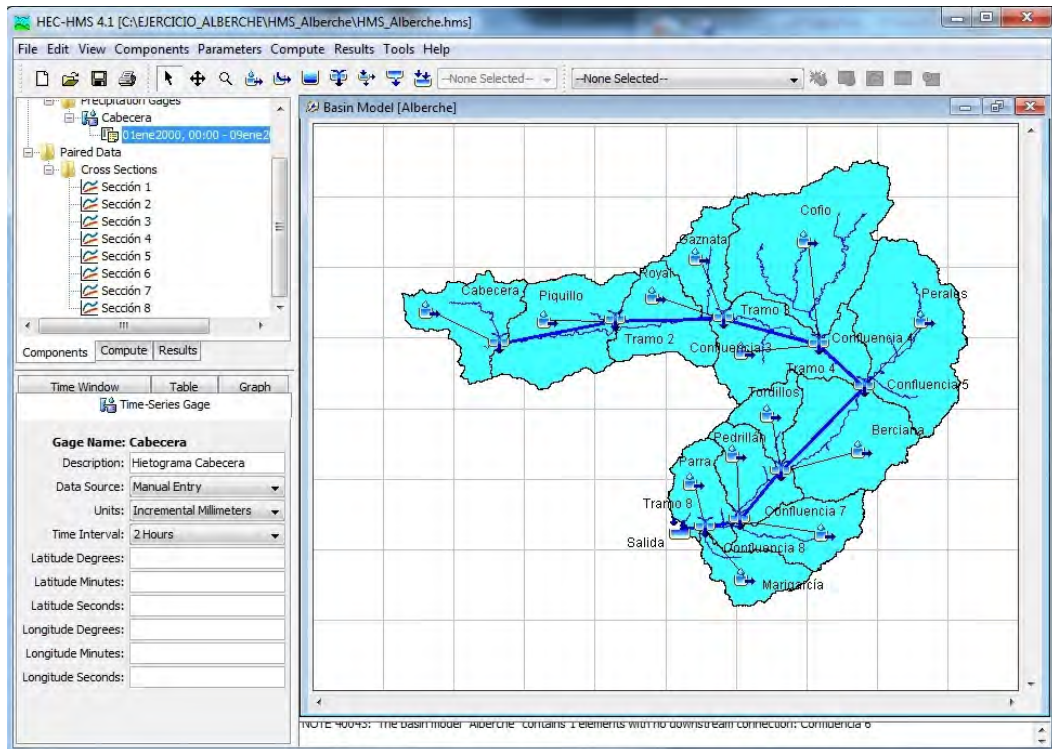
En *Data Type* seleccionamos *Precipitation Gages*. Y pinchando en *New* damos nombre al hietograma.



Al crear el hietograma, en la parte izquierda de la pantalla, se genera la carpeta *Time-Series Data*. Y dentro de ésta, la subcarpeta *Precipitation Gages*.

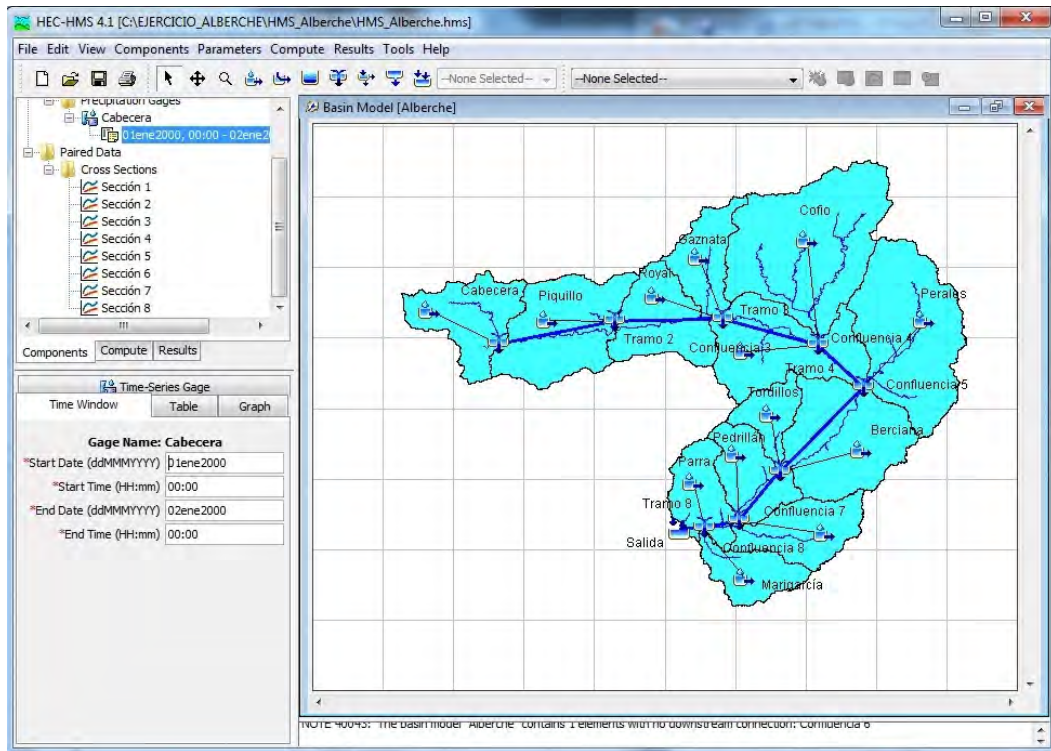
En la pestaña *Time-Series Gage* se define:

- ✓ *Description*: es la descripción que se ha dado al generar el hietograma.
- ✓ *Data Source*: seleccionamos *Manual Entry*.
- ✓ *Units*: seleccionamos las unidades de medida (*Incremental Milimeters*).
- ✓ *Time Interval*: seleccionamos el intervalo del hietograma (*2 Hours*).
- ✓ *Latitude Degrees*, *Latitude Minutes*, *Latitude Seconds*, *Longitude Degrees*, *Longitude Minutes*, *Longitude Seconds*: lo dejamos en blanco.

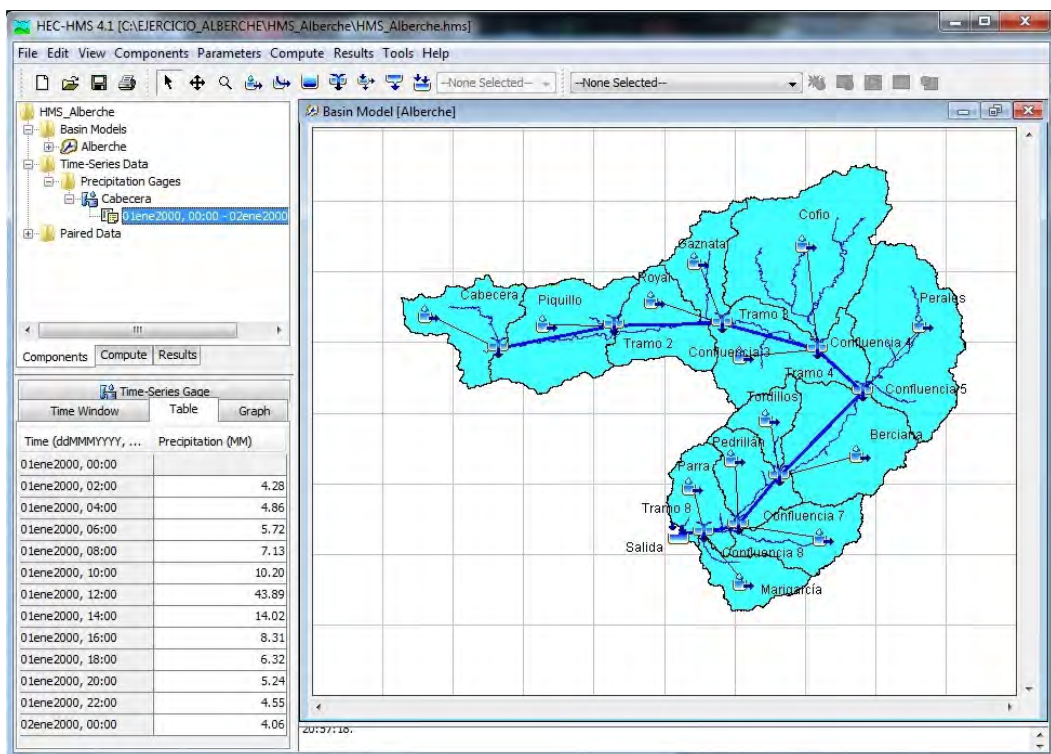


En la pestaña *Time Window* se define:

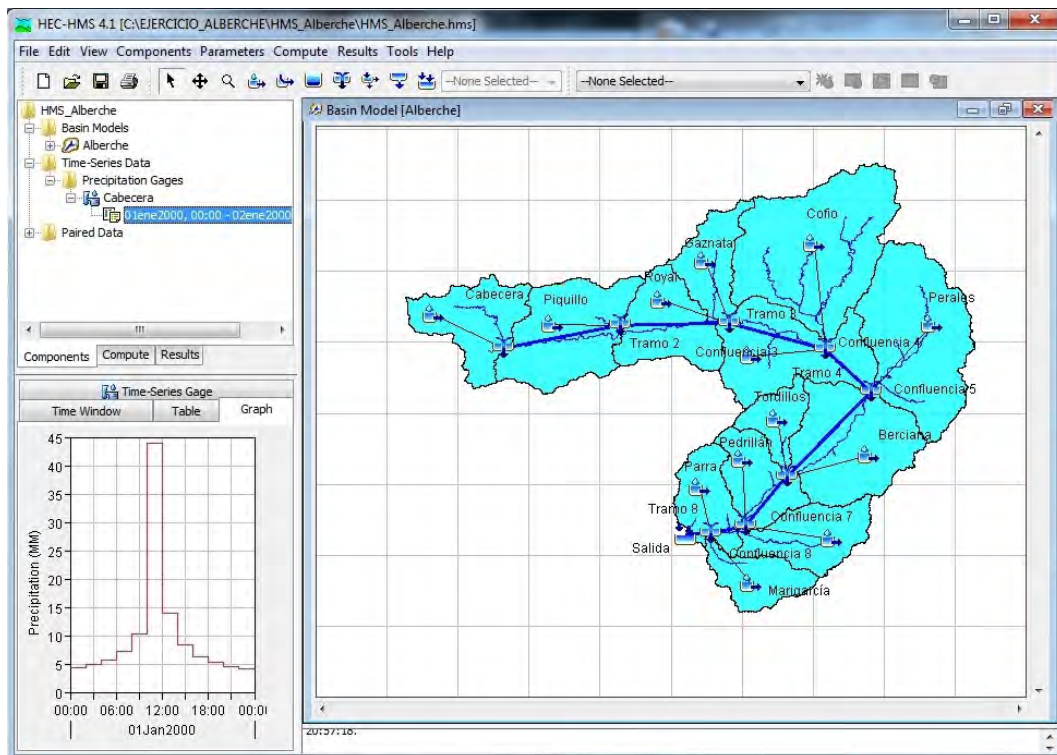
- ✓ *Start Date (ddMMMYYYY)*: es la fecha de comienzo de la precipitación. Dejamos la fecha que viene por defecto (01ene2000).
- ✓ *Start Time (HH:mm)*: es la hora de comienzo de la precipitación. Dejamos la fecha que viene por defecto (00:00).
- ✓ *End Date (ddMMMYYYY)*: es la fecha de finalización de la precipitación. Como nuestros hietogramas tienen 24 horas, ponemos el día 02ene2000.
- ✓ *End Time (HH:mm)*: es la hora de finalización de la precipitación. Como nuestros hietogramas tienen 12 bloques, ponemos las 00:00. De este modo se creará una tabla con 12 intervalos de 2 horas cada uno, que coincide con los hietogramas generados.



En la pestaña *Table* introducimos los valores de cada bloque, que se encuentran en el archivo *Hietogramas.xlsx*.



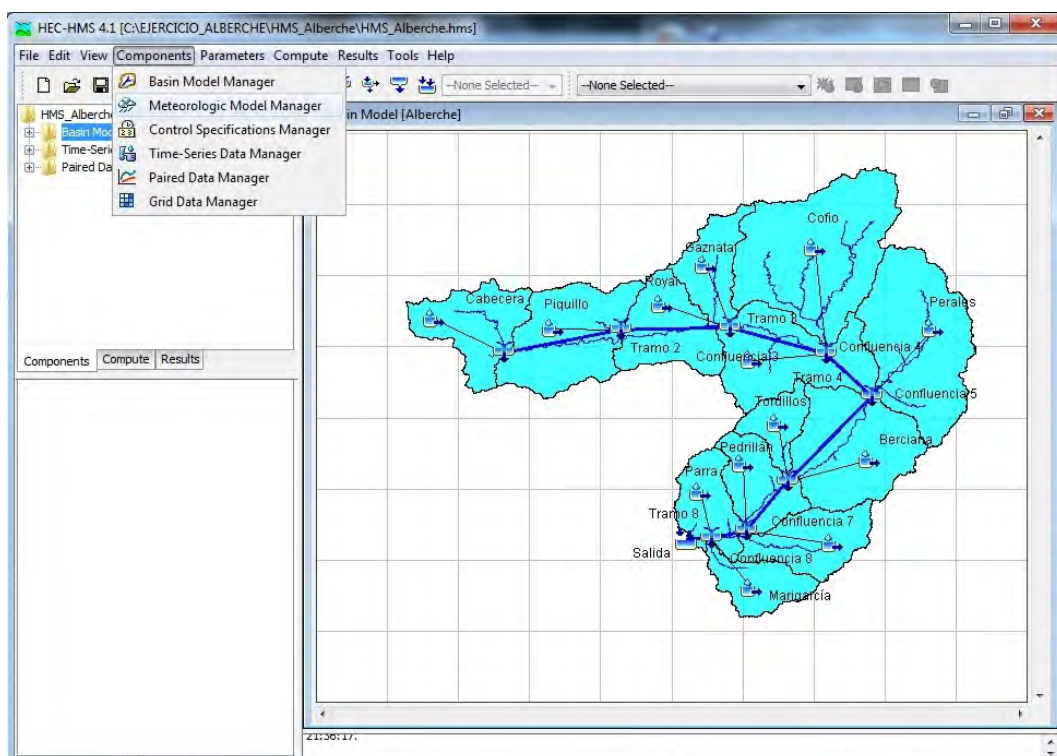
En la pestaña *Graph* se puede observar gráficamente el hietograma.



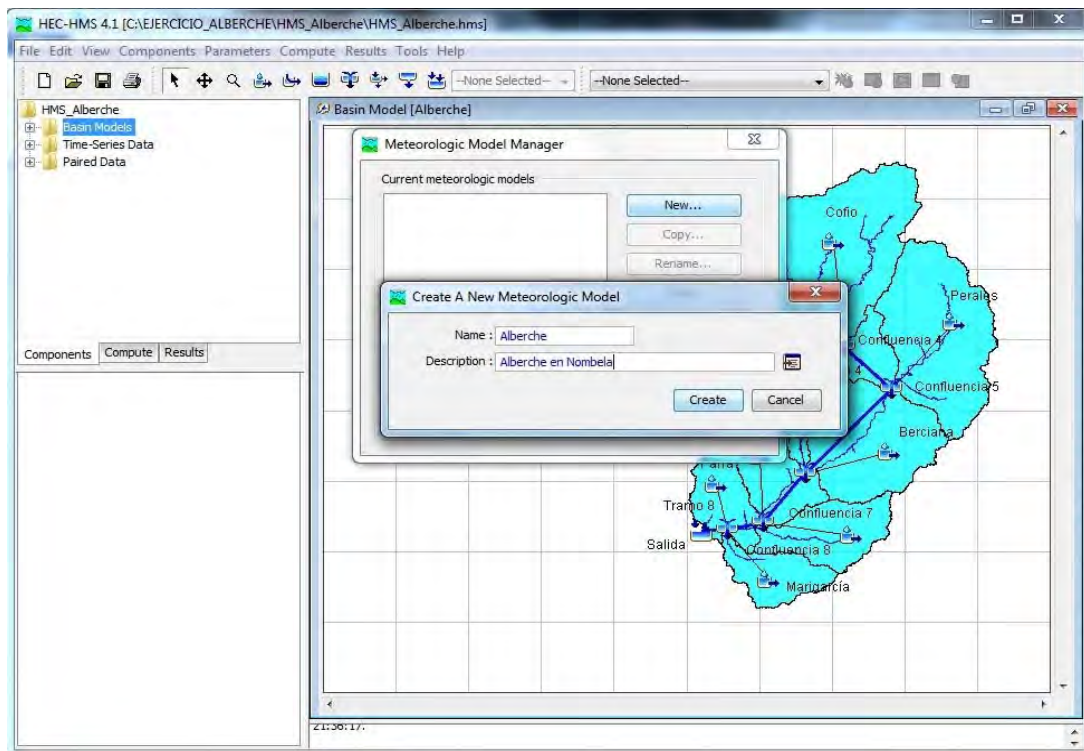
El proceso se repite para cada una de las subcuencas.

Paso 2. Creación del modelo meteorológico

Components → *Meteorologic Model Manager*



Pinchando en *New* damos nombre al modelo.

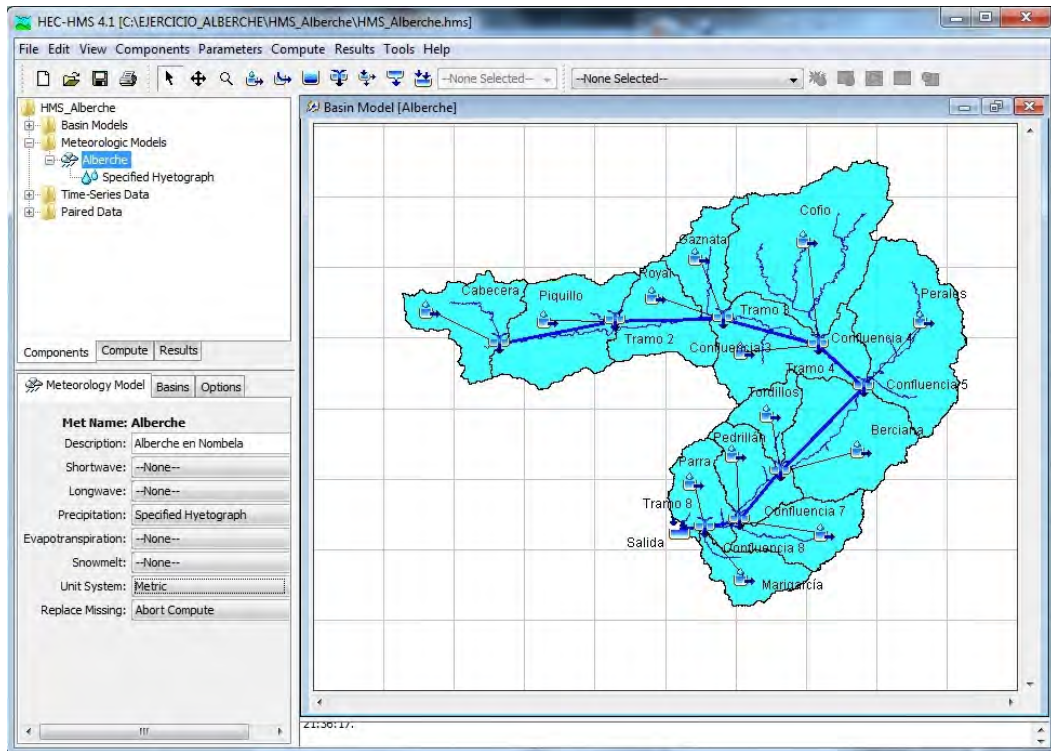


Al crear el modelo, en la parte izquierda de la pantalla, se genera la carpeta *Meteorologic Models*.

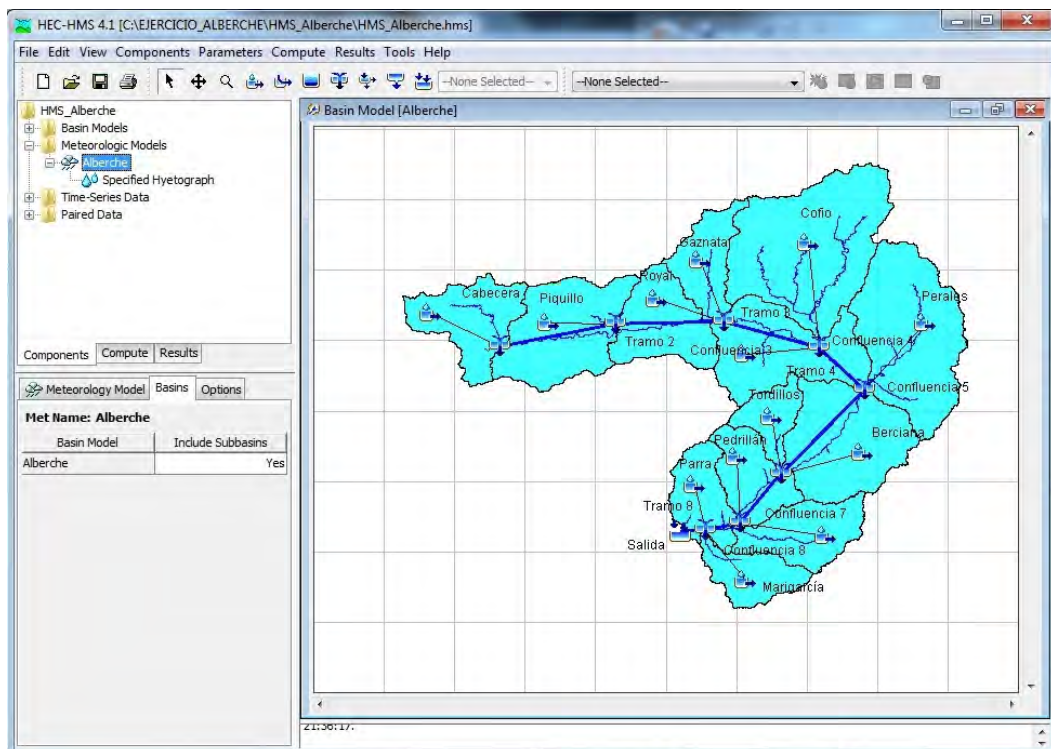
Paso 3. Asociación de hietogramas a las subcuencas

Pinchando sobre el modelo meteorológico generado (Alberche), en la pestaña *Meteorology Model* definimos:

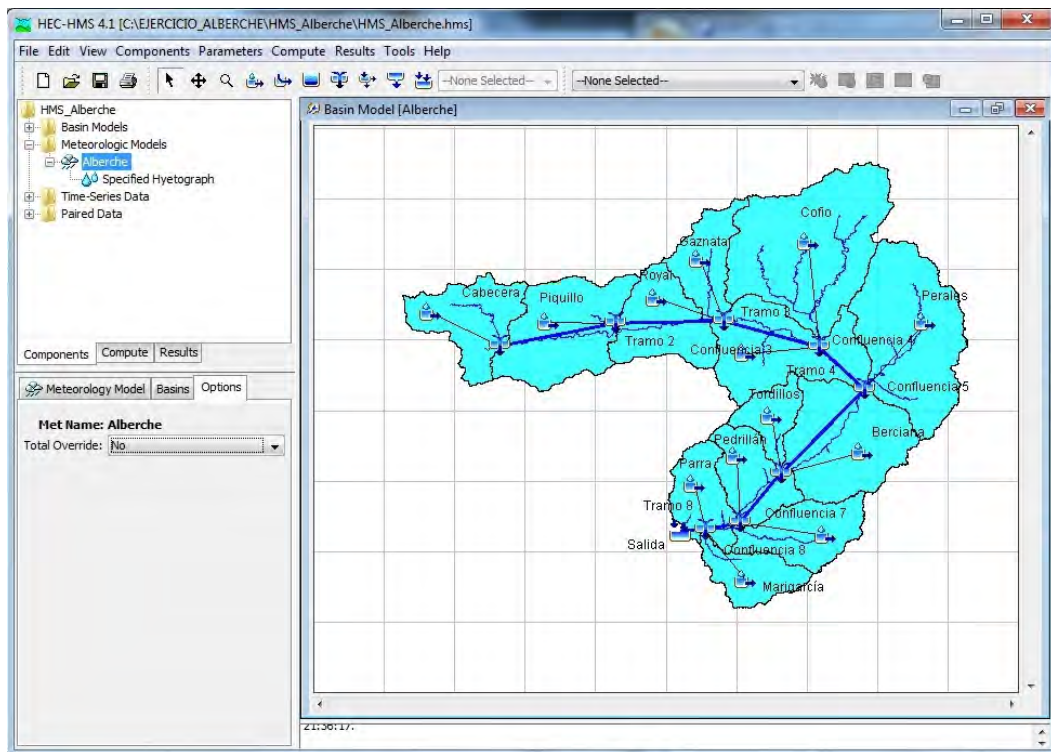
- ✓ *Description*: es la descripción que se ha dado al generar el modelo meteorológico.
- ✓ *Shortwave*: --None--.
- ✓ *Longwave*: --None--.
- ✓ *Precipitation*: seleccionamos *Specified Hyetograph*.
- ✓ *Evapotranspiration*: --None--.
- ✓ *Snowmelt*: --None--.
- ✓ *Unit System*: seleccionamos el sistema de medida (*Metric*).
- ✓ *Replace Missing*: seleccionamos *Abort Compute*.



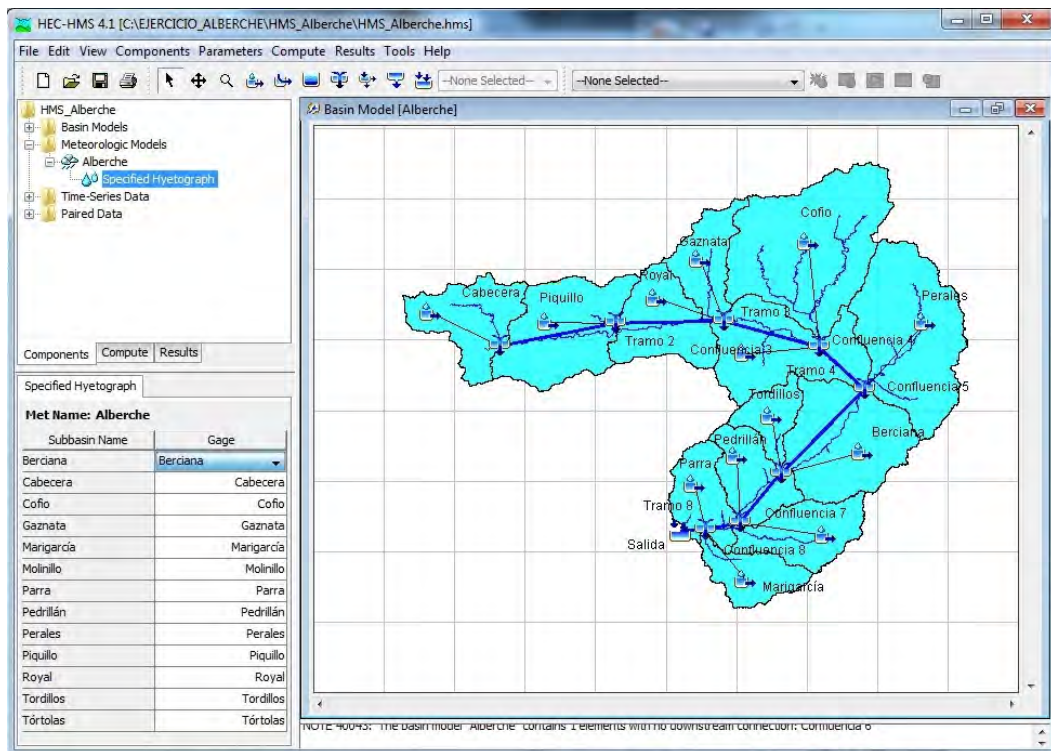
En la pestaña *Basins* seleccionamos *Yes*, dentro de *Include Subbasins*, para asignar el modelo de cuenca al modelo meteorológico.



En la pestaña *Options* seleccionamos *No*, dentro de *Total Override*.



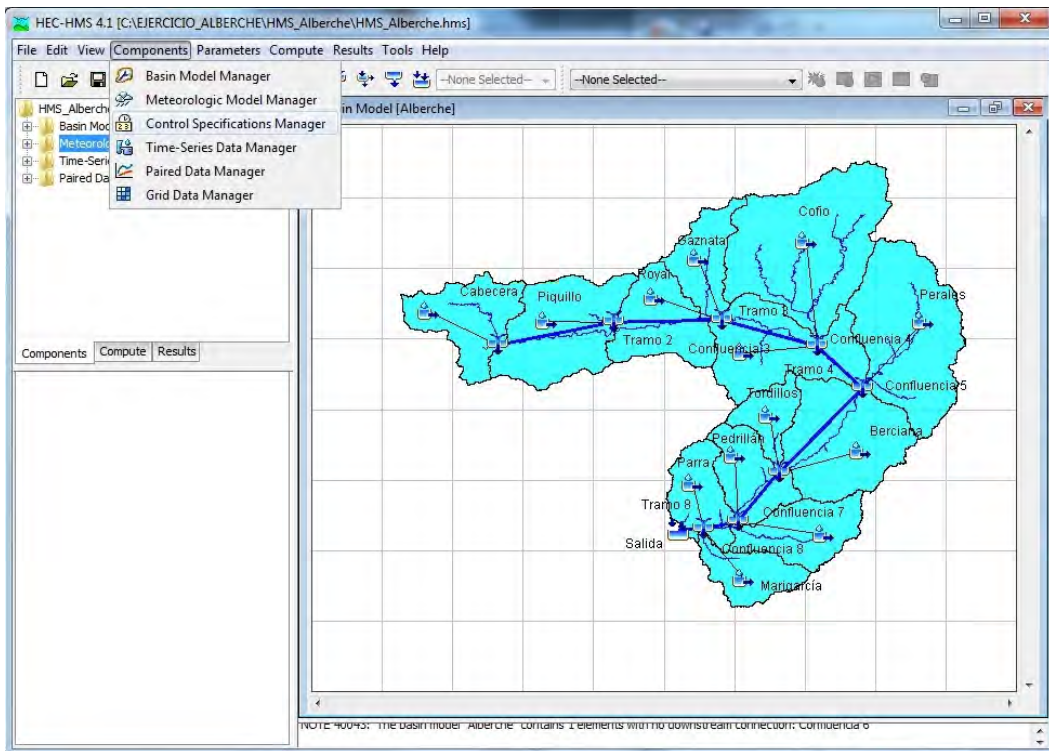
Para asignar el hietograma a cada subcuenca pinchamos sobre *Specified Hyetograph* y realizamos la asignación.



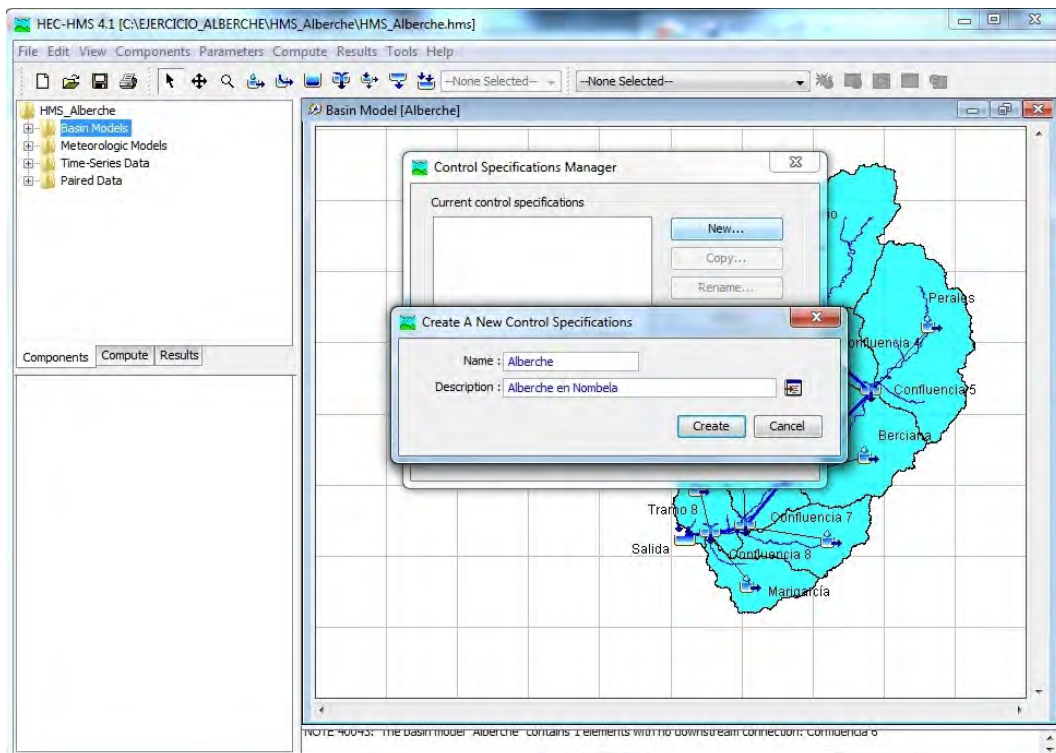
7.4. Especificaciones de control (Control Specifications)

Paso 1. Creación de las especificaciones de control

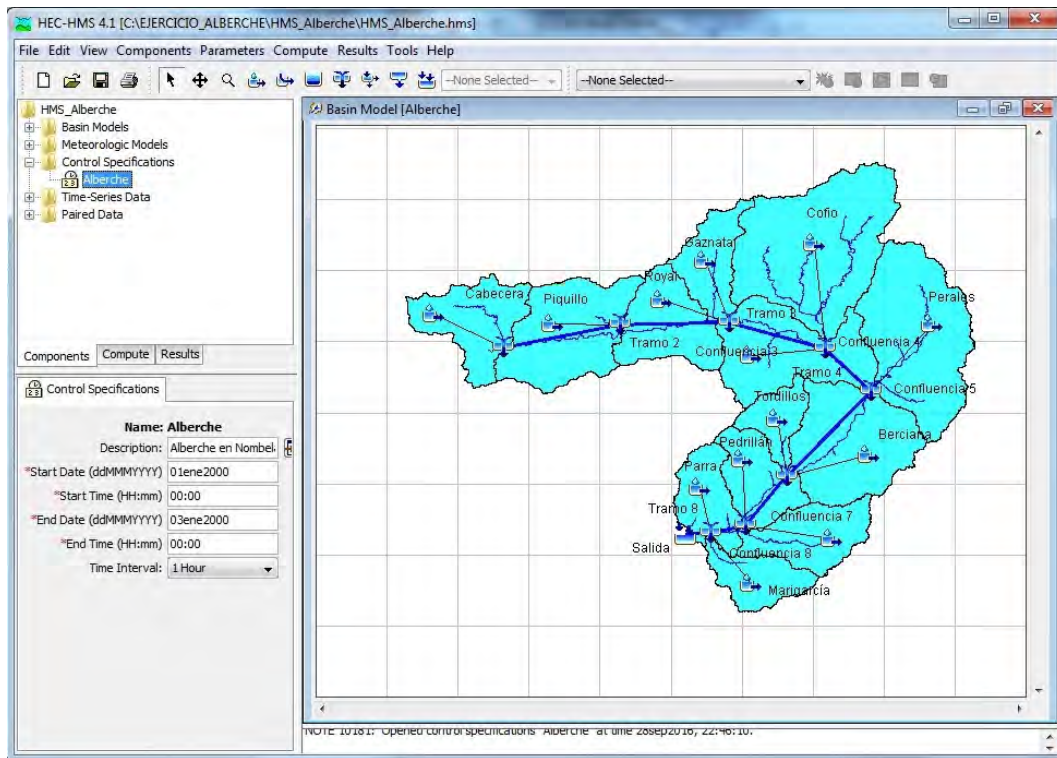
Components → **Control Specifications Manager**



Pinchando en *New* damos nombre a las especificaciones de control.



Al crear las especificaciones, en la parte izquierda de la pantalla, se genera la carpeta *Control Specifications*.



En la pestaña *Control Specifications* se define:

- ✓ *Description*: es la descripción que se ha dado al generar las especificaciones de control.
- ✓ *Start Date (ddMMMYYYY)*: es la fecha de comienzo del cálculo (01ene2000).
- ✓ *Start Time (HH:mm)*: es la hora de comienzo del cálculo (00:00).
- ✓ *End Date (ddMMMYYYY)*: es la fecha de finalización del cálculo (03ene2000).
- ✓ *End Time (HH:mm)*: es la hora de finalización del cálculo (00:00).
- ✓ *Time Interval*: seleccionamos 1 Hour.

El periodo de cálculo debe definirse con el margen suficiente para incluir el periodo de las precipitaciones más el tiempo que tarda en alcanzarse el pico del hidrograma. En este caso se han establecido dos días de cálculo.

8. Calibración

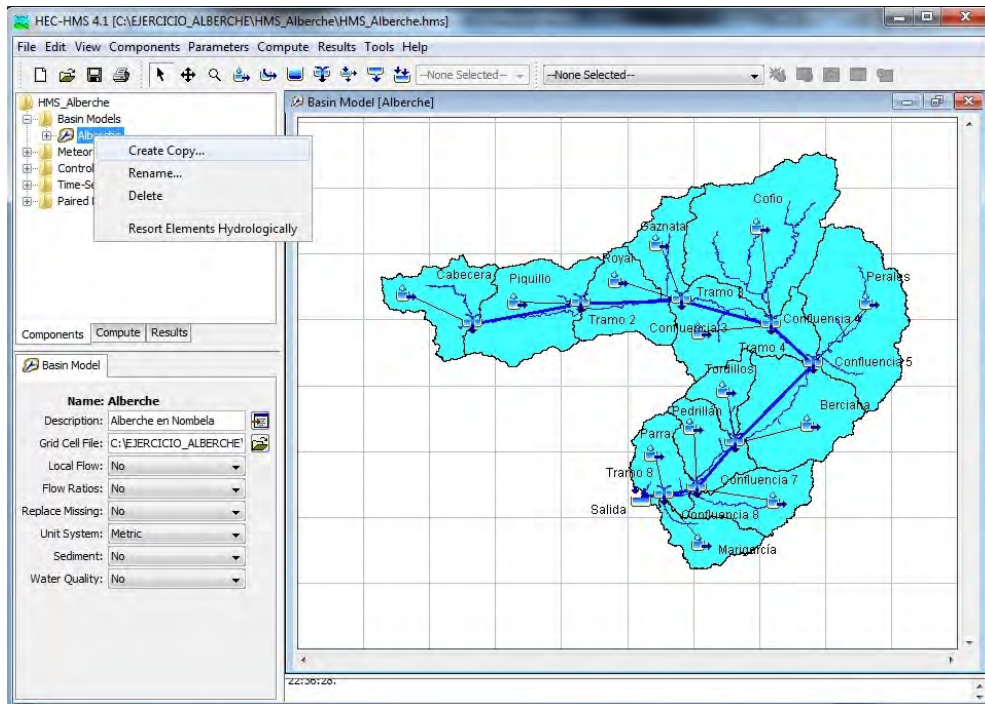
La calibración consiste en buscar los parámetros hidrológicos dentro de cada subcuenca o tramo de río que minimicen el error entre los valores observados y los valores calculados. Para ello, lo ideal sería utilizar una estación de aforos situada lo más próxima posible al punto final de la cuenca, pero en este caso existen hasta cuatro embalses dentro de la misma, por lo que no se reflejaría el comportamiento de la cuenca en condiciones naturales. Por tanto, se ha decidido utilizar la estación del SAIH AR22 Cofio en San Martín, ya que, aunque no abarca toda la cuenca, no posee ningún embalse aguas arriba y las condiciones son naturales.

Dentro de las diferentes alternativas que ofrece HEC-HMS se utilizará la calibración basada en el número de curva.

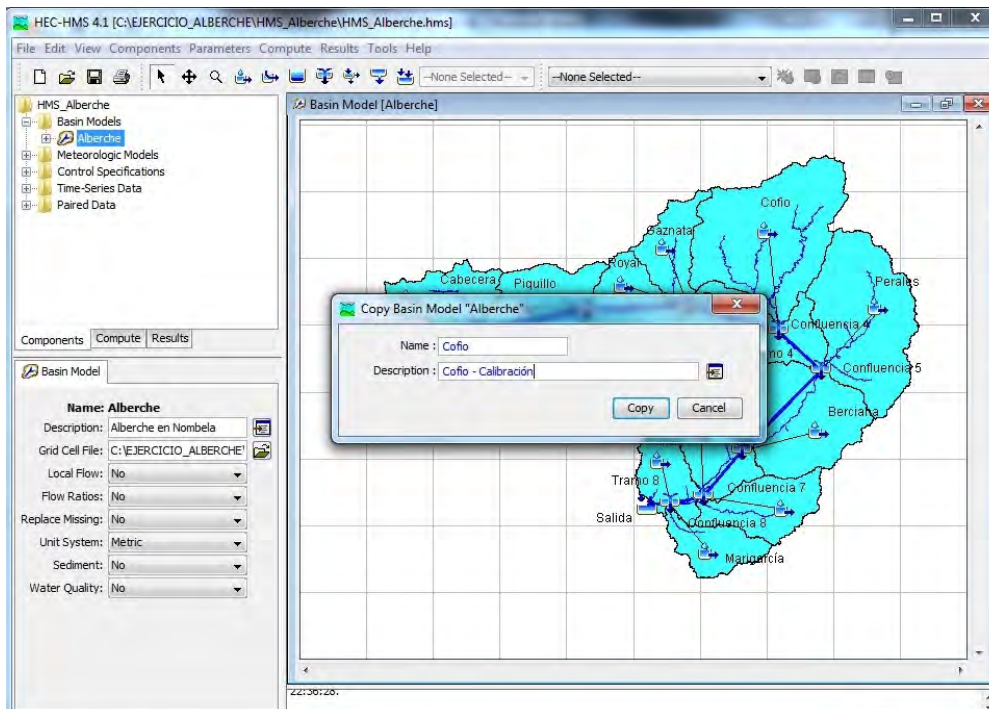
Paso 1. Creación de un nuevo modelo de cuenca

El nuevo modelo coincide prácticamente con la subcuenca del río Cofio. Por tanto, vamos a aprovechar el modelo anterior, eliminando el resto de subcuencas y modificando la superficie.

Sobre el modelo de cuenca Alberche, pinchamos con el botón derecho y seleccionando *Create Copy...*



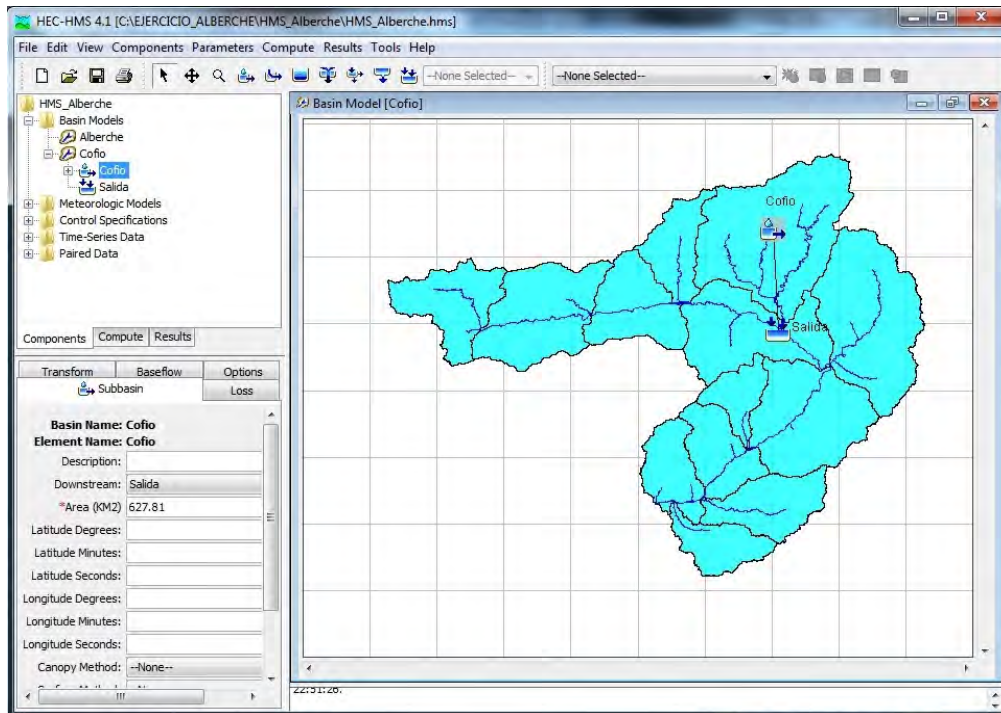
Damos nombre al nuevo modelo y lo describimos brevemente.



Eliminamos todas las subcuencas (excepto la denominada como Cofio), todos los tramos y todas las confluencias, y definimos el elemento Salida (*Sink*) en el cierre de la cuenca.

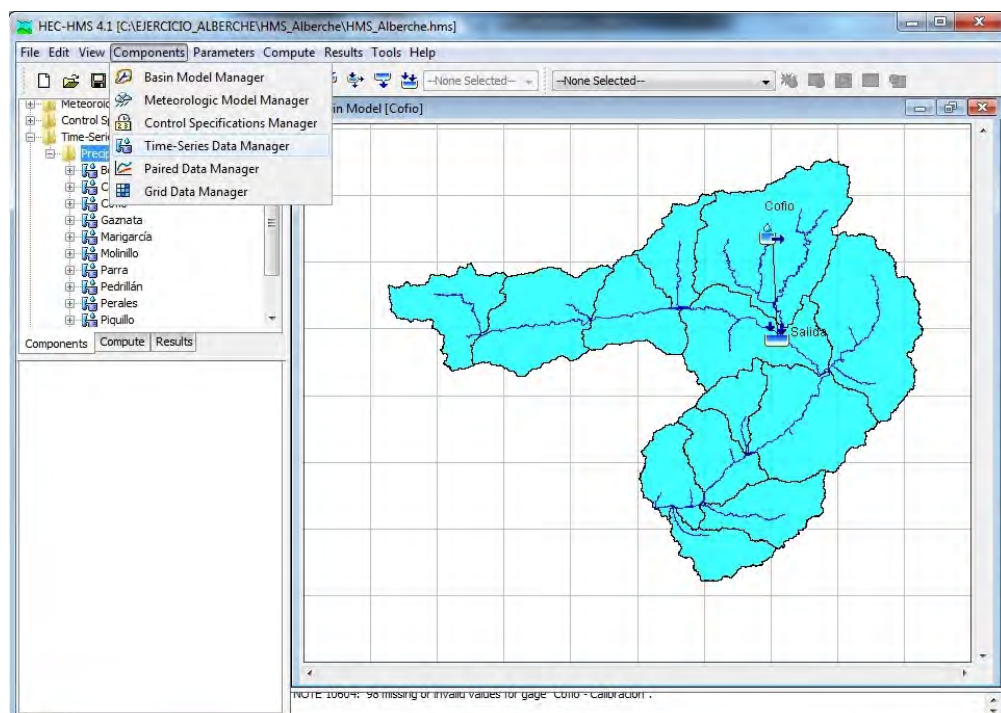
Según la información que proporciona el SAIH, el área de la cuenca donde se encuentra la estación de aforos es de 627,81 km².

En la subcuenca Cofio, dejamos todo igual excepto la superficie (627,81 km²) y el nudo de aguas abajo, que ahora es la Salida.

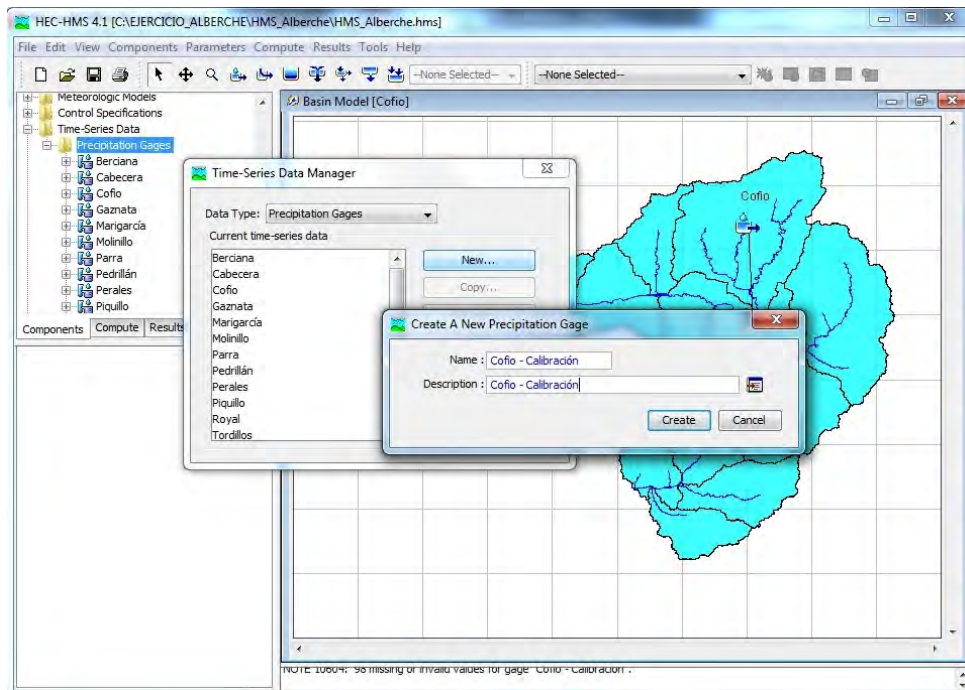


Paso 2. Creación del hietograma registrado

Components → *Time-Series Data Manager*

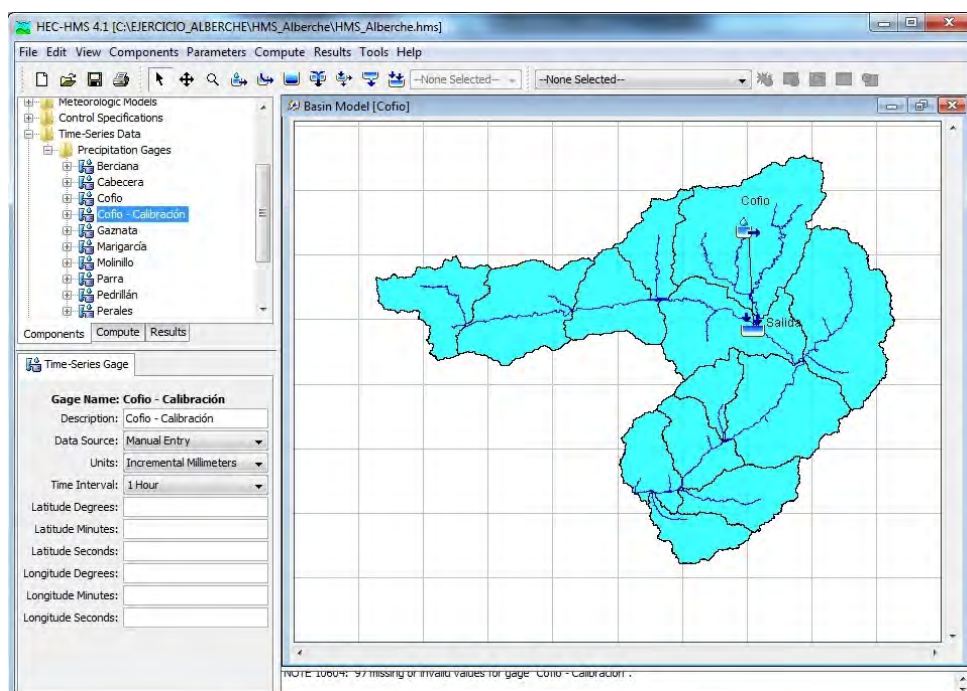


En *Data Type* seleccionamos *Precipitation Gages*. Y pinchando en *New* damos nombre al hietograma registrado.



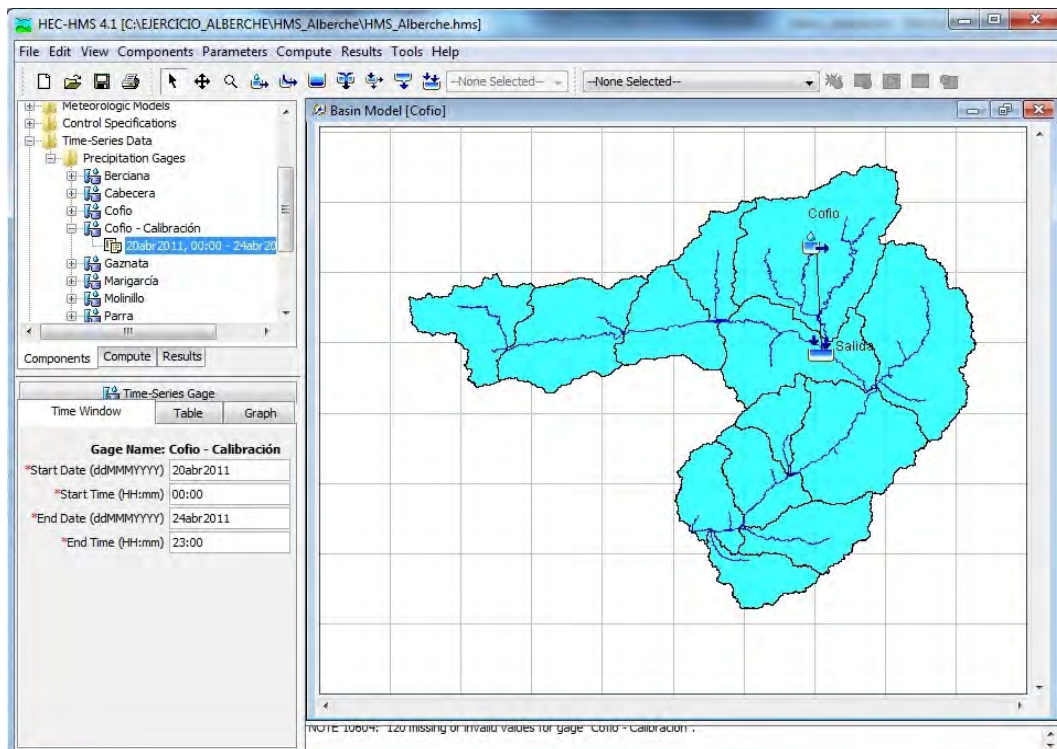
En la pestaña *Time-Series Gage* se define:

- ✓ *Description*: es la descripción que se ha dado al generar el hietograma.
- ✓ *Data Source*: seleccionamos *Manual Entry*.
- ✓ *Units*: seleccionamos las unidades de medida (*Incremental Milimeters*).
- ✓ *Time Interval*: seleccionamos el intervalo del hietograma (*1 Hour*).
- ✓ *Latitude Degrees*, *Latitude Minutes*, *Latitude Seconds*, *Longitude Degrees*, *Longitude Minutes*, *Longitude Seconds*: lo dejamos en blanco.

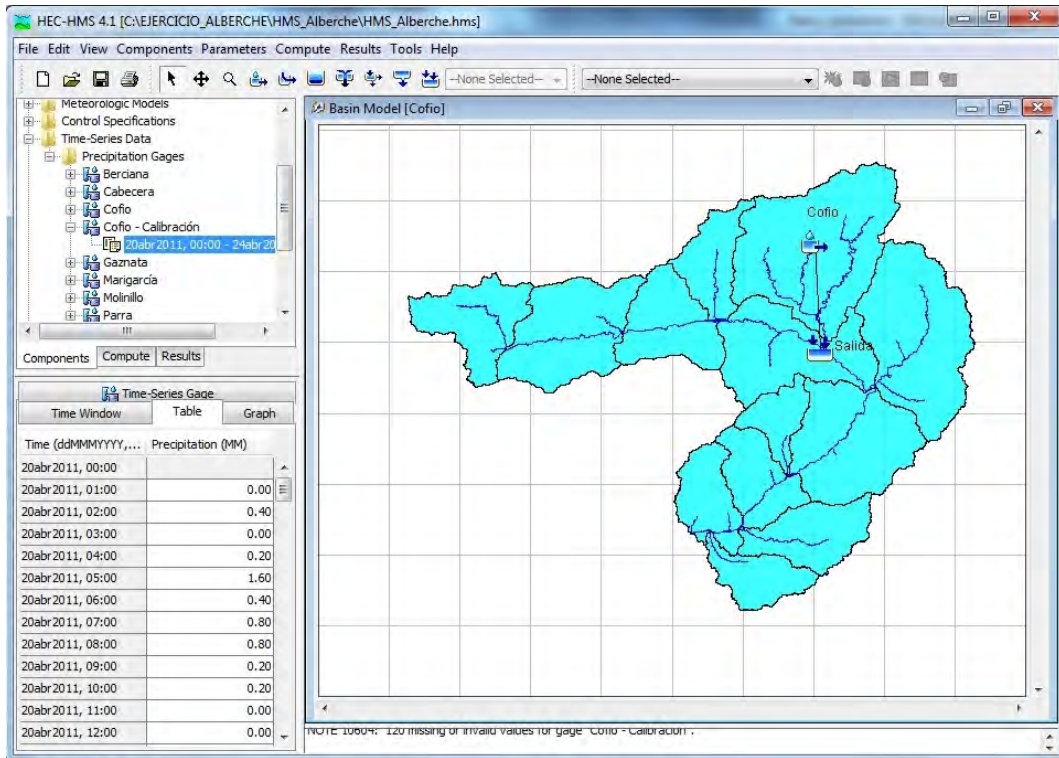


En la pestaña *Time Window* se define:

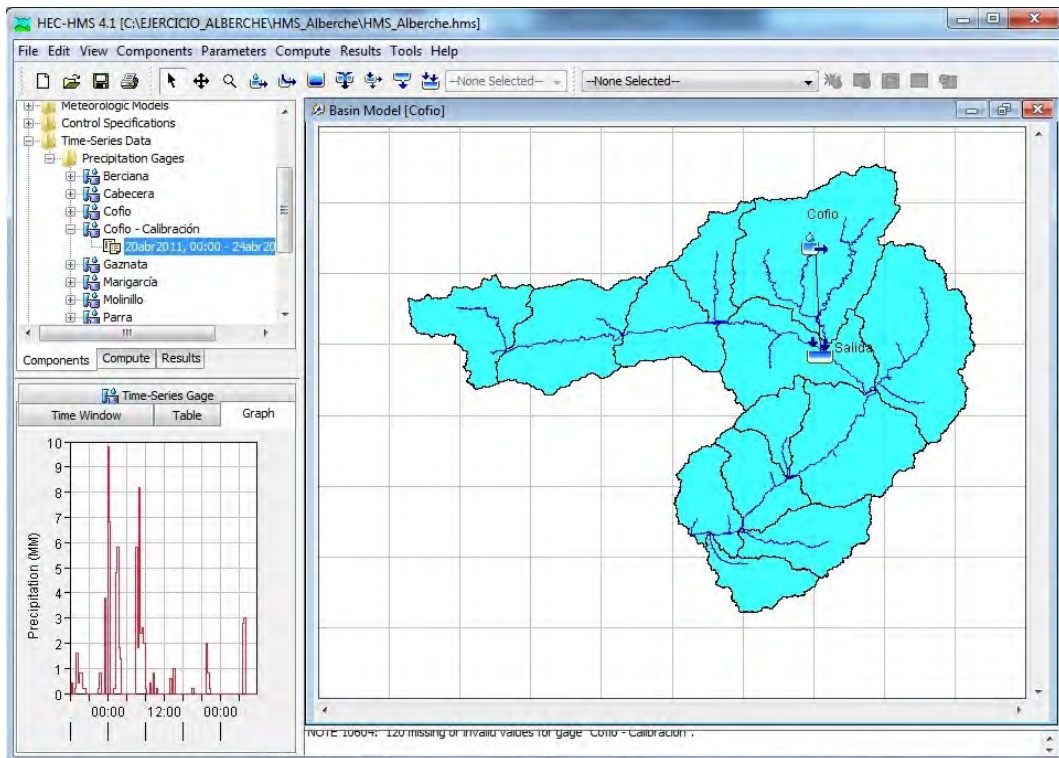
- ✓ *Start Date (ddMMYYYY)*: es la fecha de comienzo de la precipitación. Ponemos como fecha el 20 de abril de 2011.
- ✓ *Start Time (HH:mm)*: es la hora de comienzo de la precipitación. Dejamos la fecha que viene por defecto (00:00).
- ✓ *End Date (ddMMYYYY)*: es la fecha de finalización de la precipitación. Ponemos como fecha el 24 de abril de 2011.
- ✓ *End Time (HH:mm)*: es la hora de finalización de la precipitación. Ponemos las 23:00.



En la pestaña *Table* introducimos los valores de precipitaciones registrados, que se encuentran en el archivo Datos_calibración.xlsx.

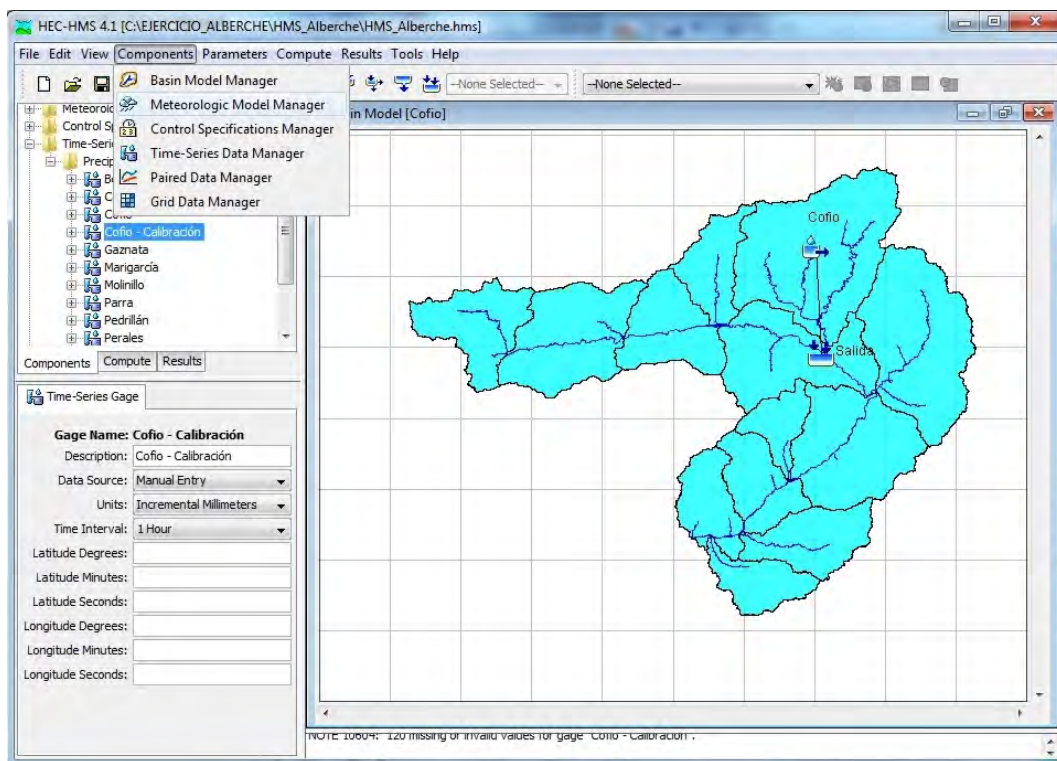


En la pestaña *Graph* se puede observar gráficamente el hietograma.

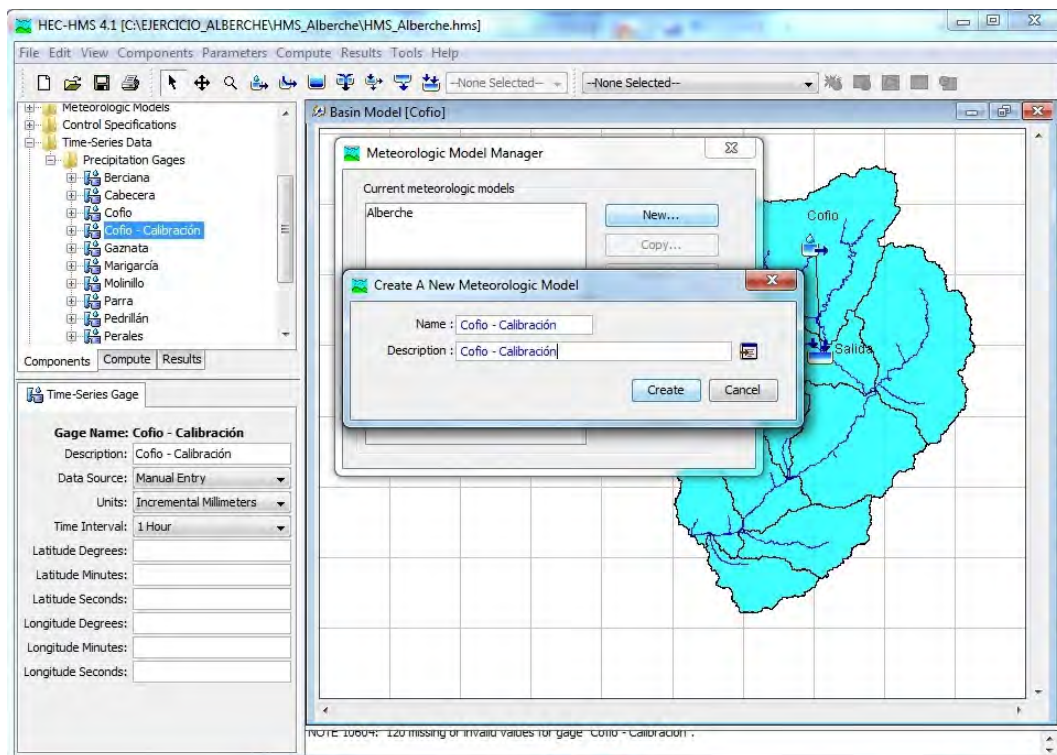


Paso 3. Creación de un nuevo modelo meteorológico

Components → *Meteorologic Model Manager*



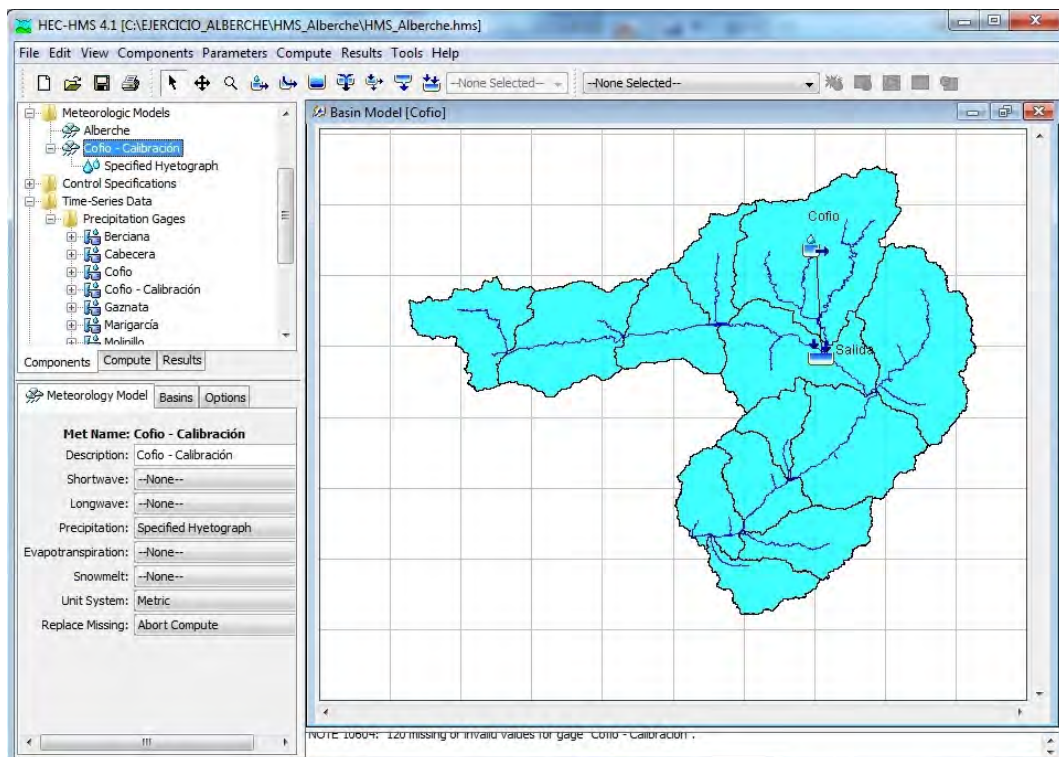
Pinchando en *New* damos nombre al modelo.



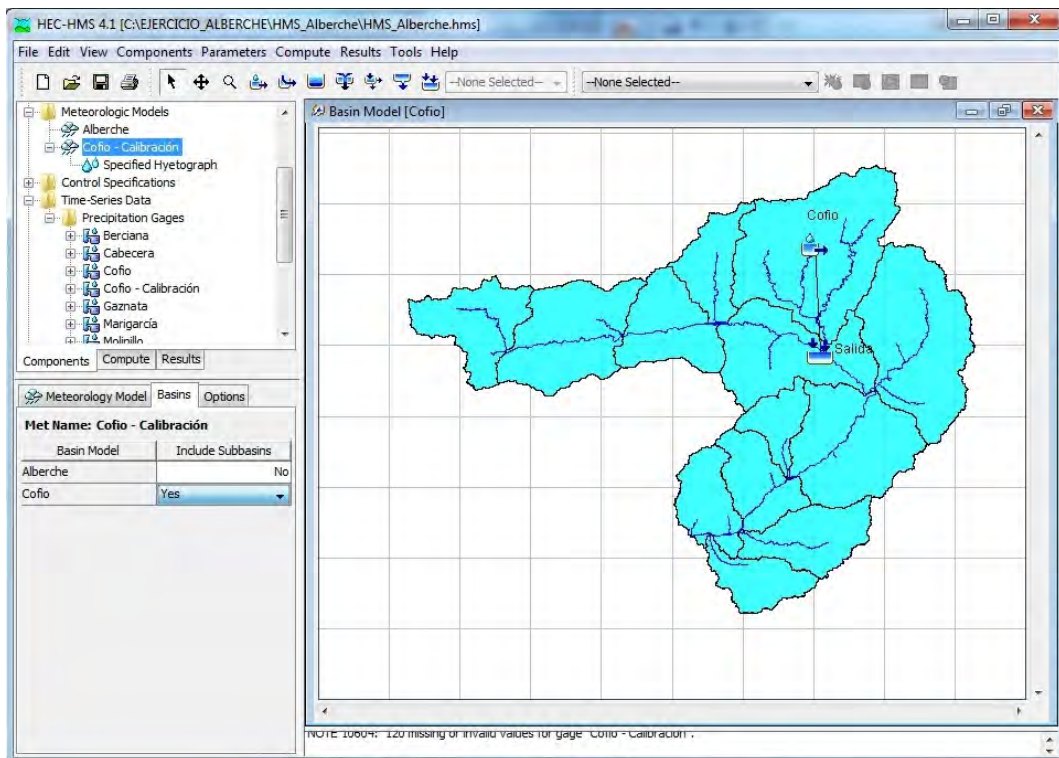
Paso 4. Asociación del hietograma a la cuenca

Pinchando sobre el modelo meteorológico generado (Cofio - Calibración), en la pestaña *Meteorology Model* definimos:

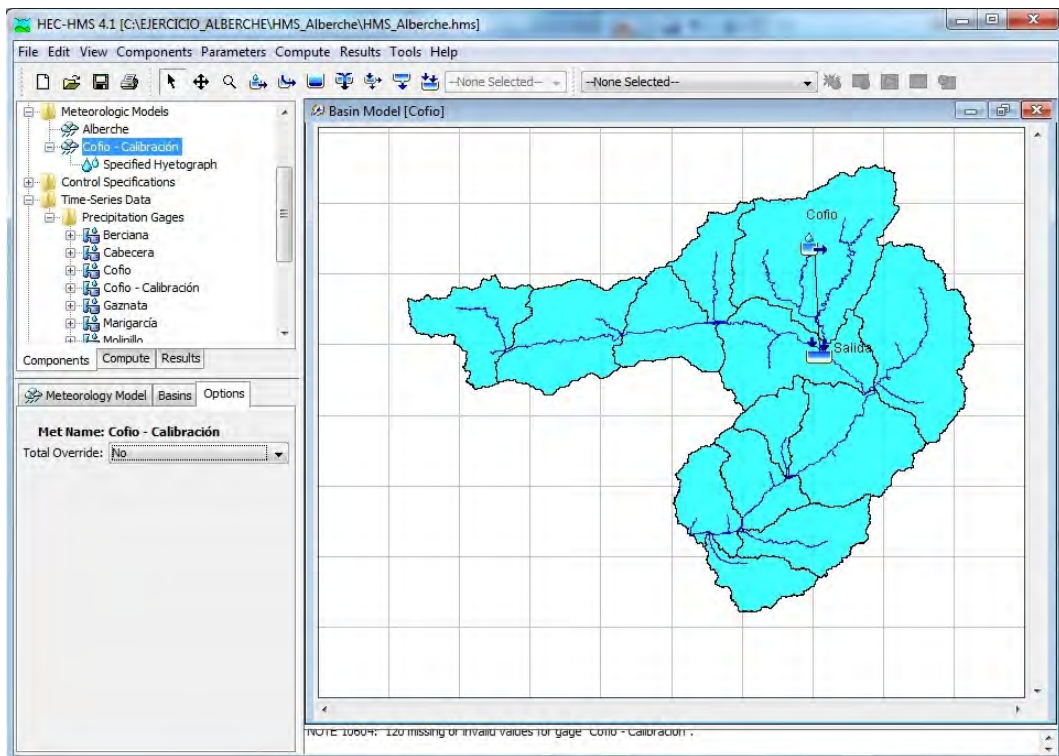
- ✓ *Description*: es la descripción que se ha dado al generar el modelo meteorológico.
- ✓ *Shortwave*: --None--.
- ✓ *Longwave*: --None--.
- ✓ *Precipitation*: seleccionamos *Specified Hyetograph*.
- ✓ *Evapotranspiration*: --None--.
- ✓ *Snowmelt*: --None--.
- ✓ *Unit System*: seleccionamos el sistema de medida (*Metric*).
- ✓ *Replace Missing*: seleccionamos *Abort Compute*.



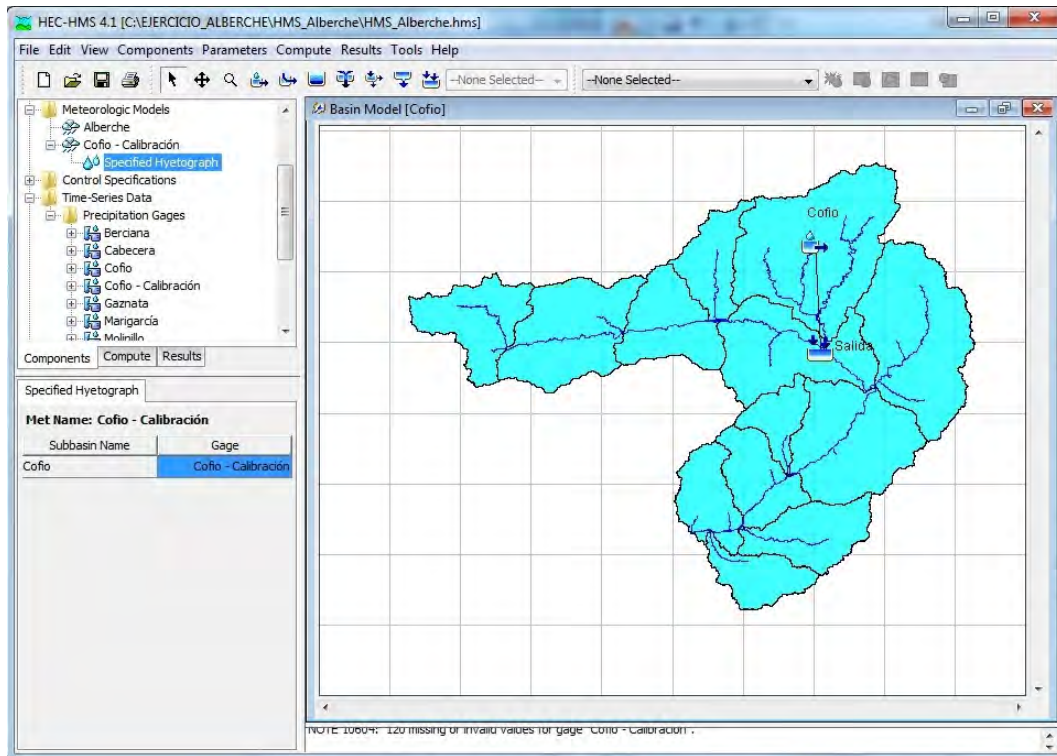
En la pestaña *Basins* seleccionamos *Yes*, dentro de *Include Subbasins*, en el modelo Cofio.



En la pestaña *Options* seleccionamos *No*, dentro de *Total Override*.

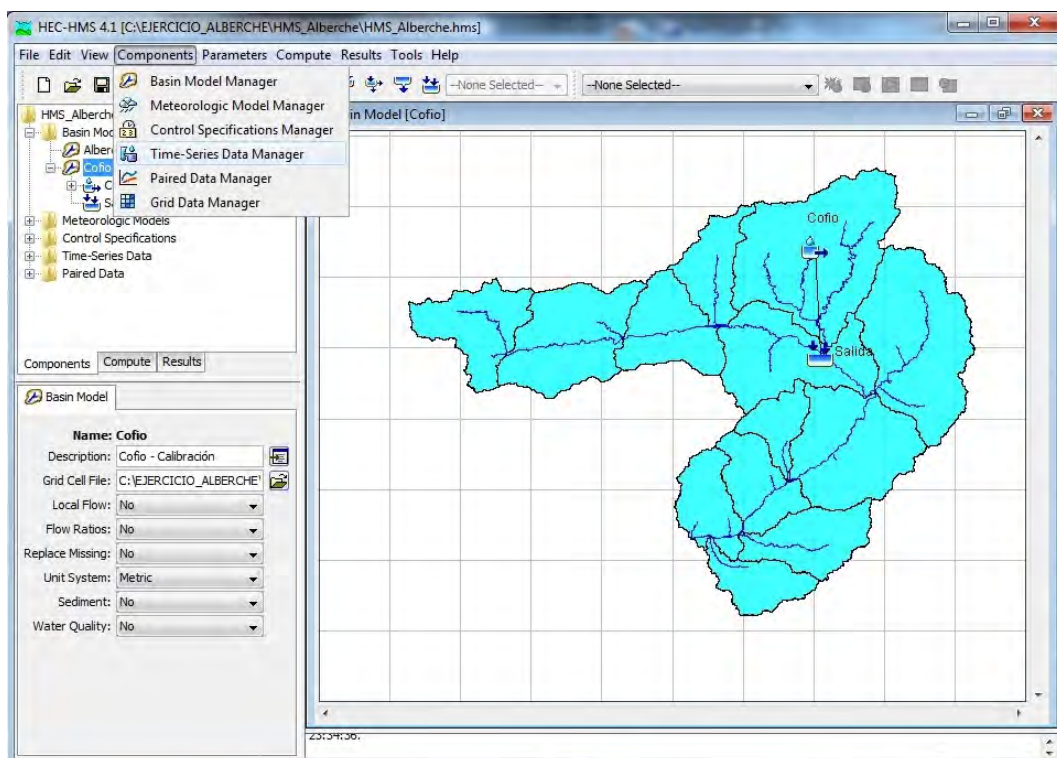


Para asignar el hietograma a la cuenca pinchamos sobre *Specified Hyetograph* y realizamos la asignación.

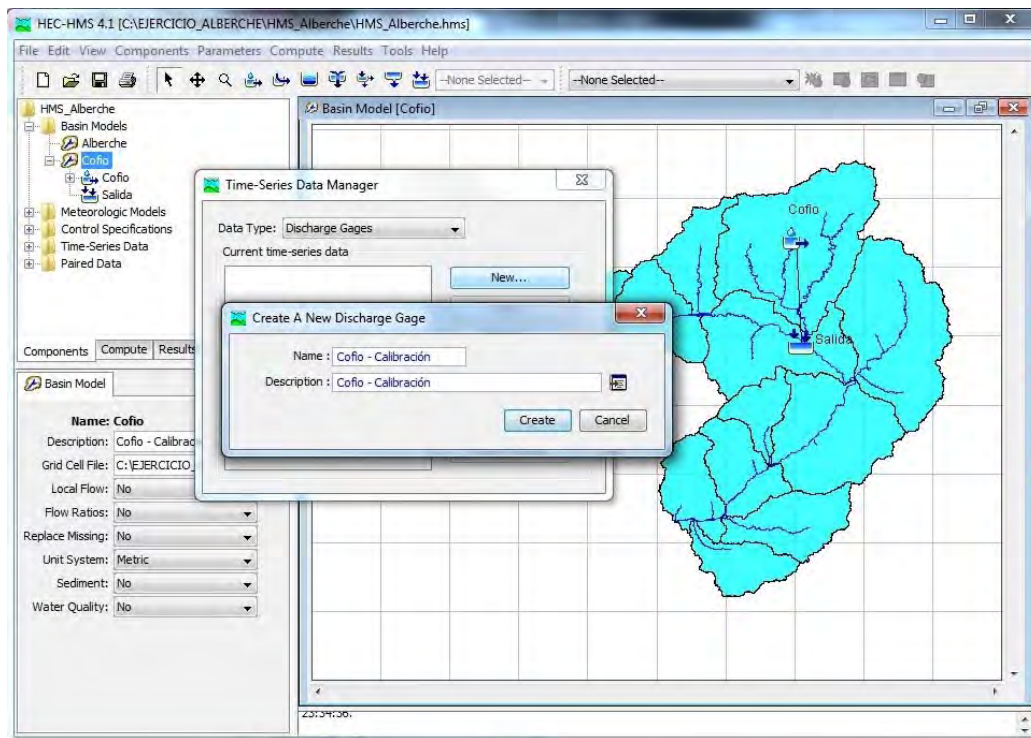


Paso 5. Creación del hidrograma registrado

Components → Time-Series Data Manager

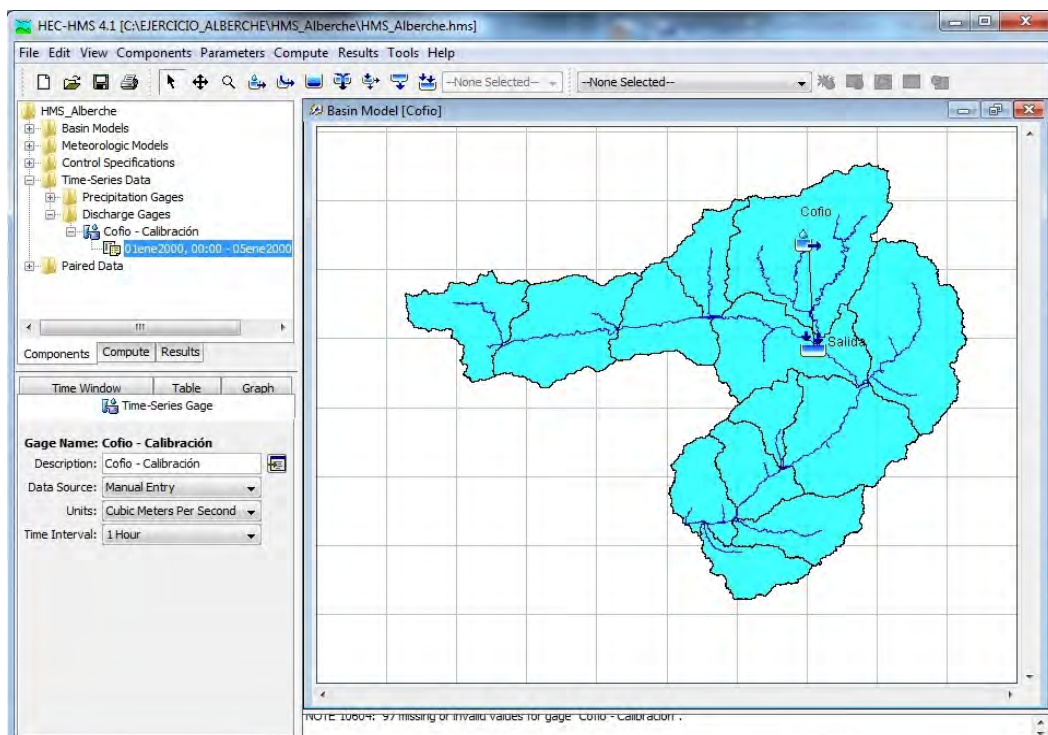


En *Data Type* seleccionamos *Discharge Gages*. Y pinchando en *New* damos nombre al hidrograma registrado.



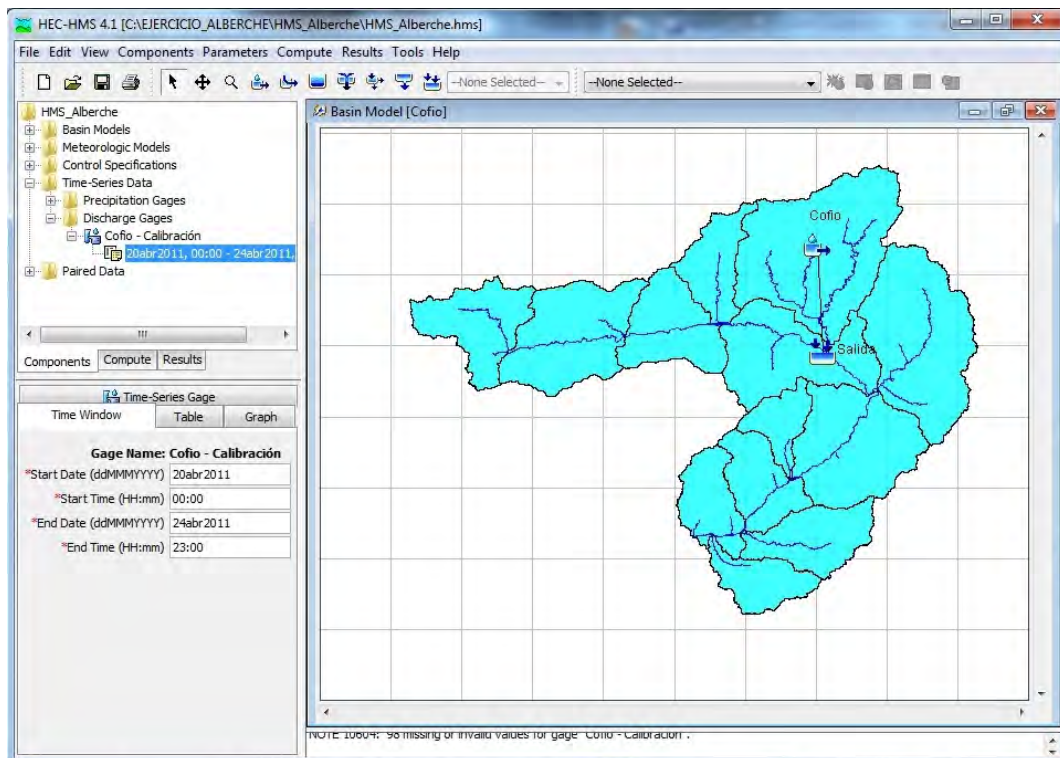
En la pestaña *Time-Series Gage* se define:

- ✓ *Description*: es la descripción que se ha dado al generar el hidrograma.
- ✓ *Data Source*: seleccionamos *Manual Entry*.
- ✓ *Units*: seleccionamos las unidades de medida (*Cubic Meters Per Second*).
- ✓ *Time Interval*: seleccionamos el intervalo del hidrograma (*1 Hour*).

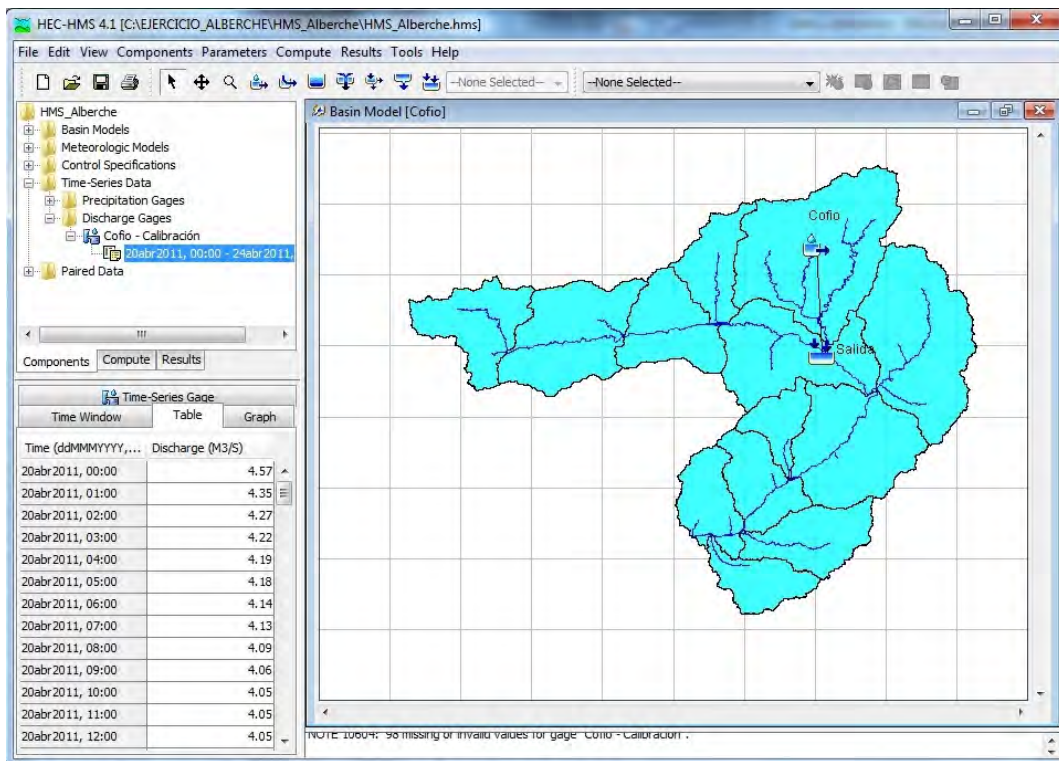


En la pestaña *Time Window* se define:

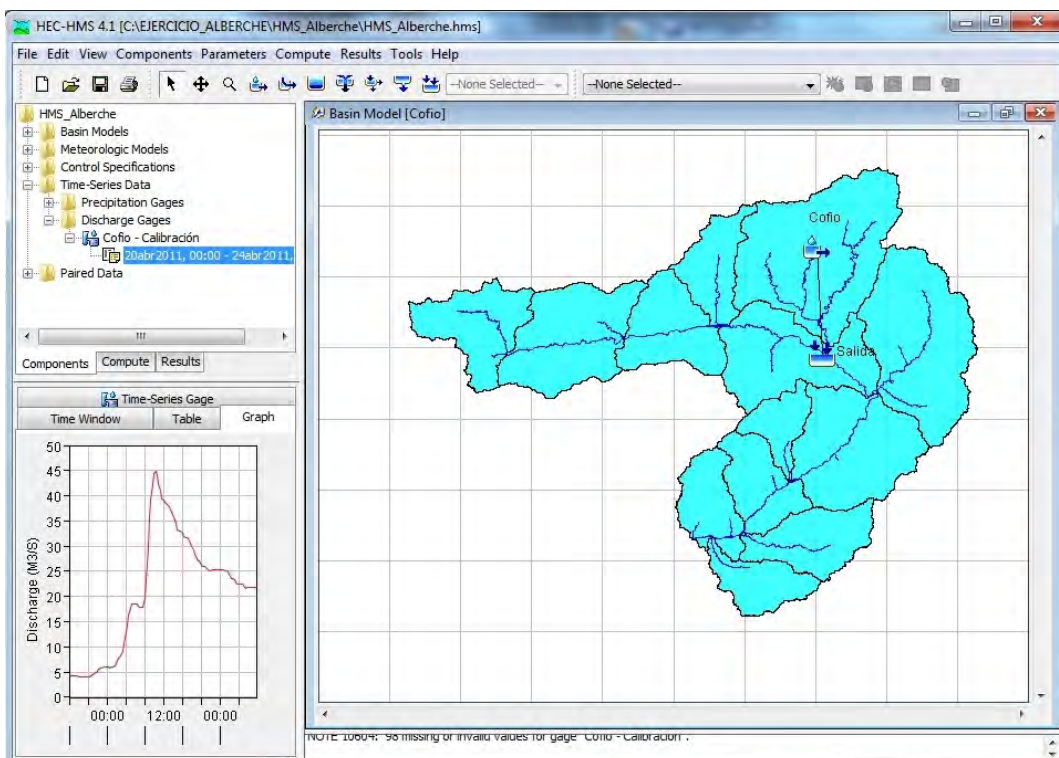
- ✓ *Start Date (ddMMYYYY)*: es la fecha de comienzo de las medidas de caudal registrado. Ponemos como fecha el 20 de abril de 2011.
- ✓ *Start Time (HH:mm)*: es la hora de comienzo de las medidas de caudal. Dejamos la fecha que viene por defecto (00:00).
- ✓ *End Date (ddMMYYYY)*: es la fecha de finalización de las medidas de caudal registrado. Ponemos como fecha el 24 de abril de 2011.
- ✓ *End Time (HH:mm)*: es la hora de finalización de las medidas de caudal. Ponemos las 23:00.



En la pestaña *Table* introducimos los valores de caudal registrado, que se encuentran en el archivo Datos_calibración.xlsx.

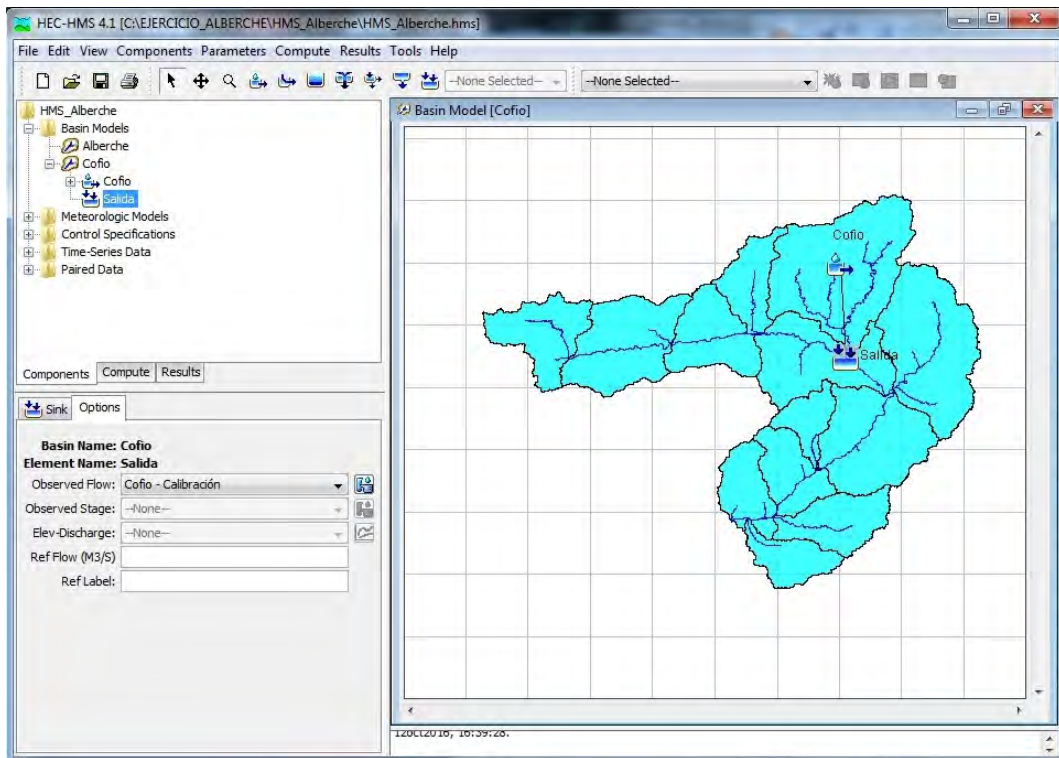


En la pestaña *Graph* se puede observar gráficamente el hidrograma registrado.



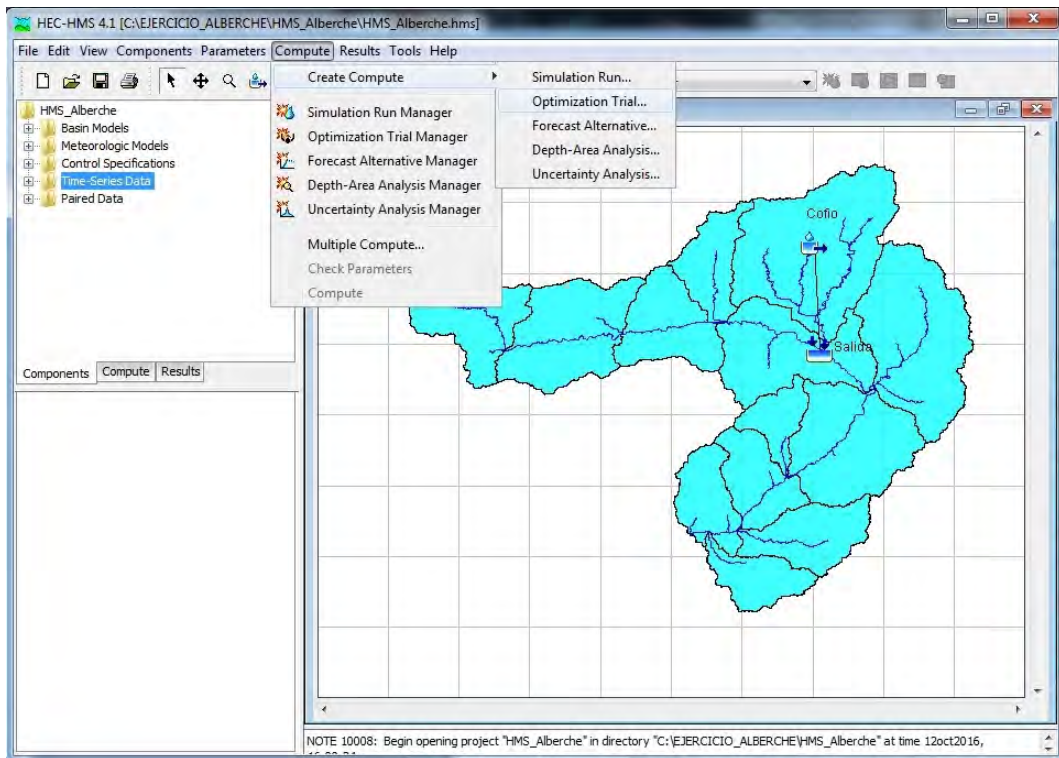
Paso 6. Asignación del hidrograma al punto de cierre

Pinchando sobre el elemento Salida del modelo de cuenca Cofio, en la pestaña *Options* asociamos el hidrograma registrado (Cofio - Calibración) en *Observed Flow*.

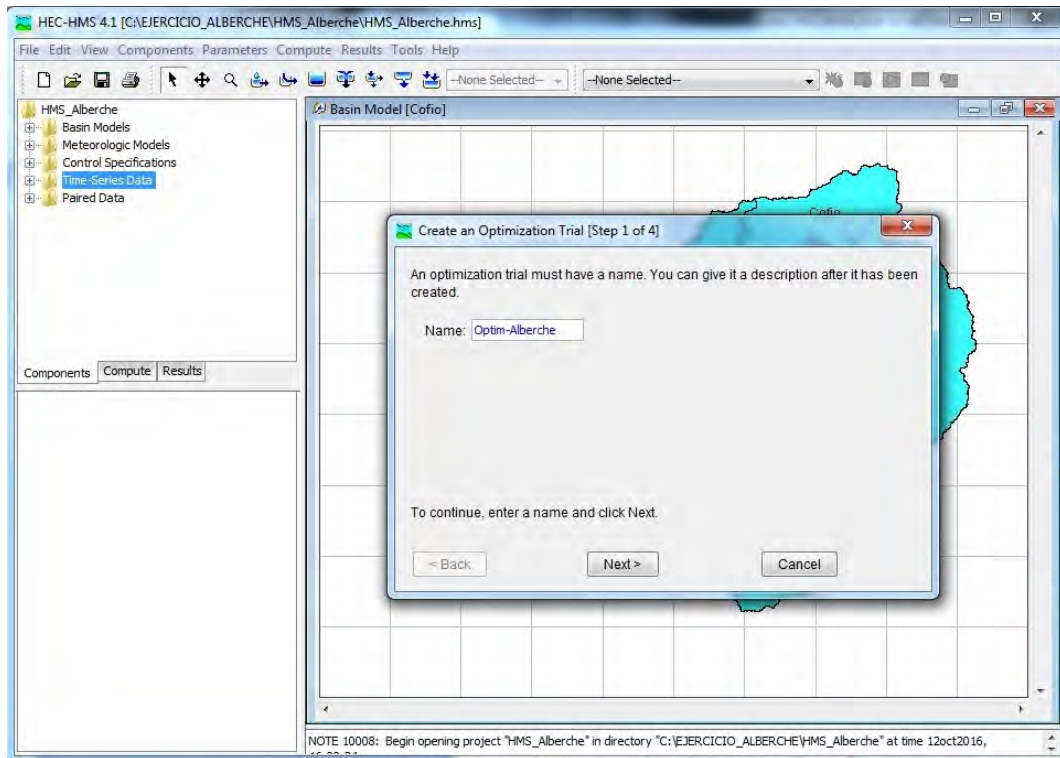


Paso 7. Creación de la calibración

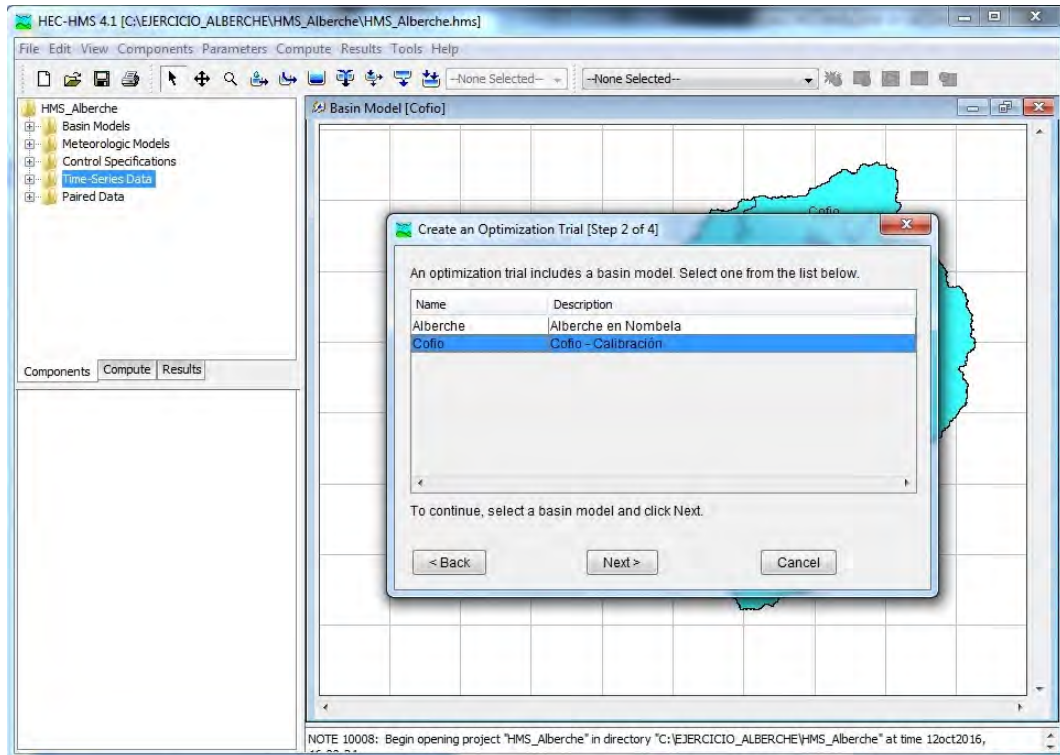
Compute → *Create Compute* → *Optimization Trial...*



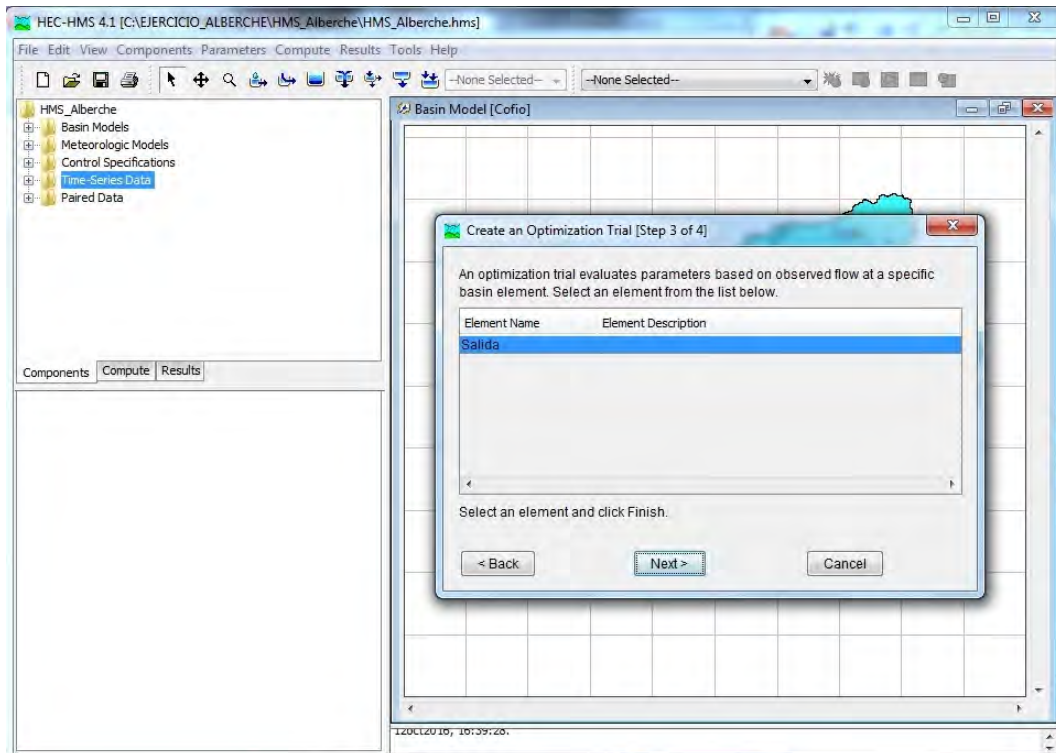
Damos nombre a la simulación (Optim-Alberche).



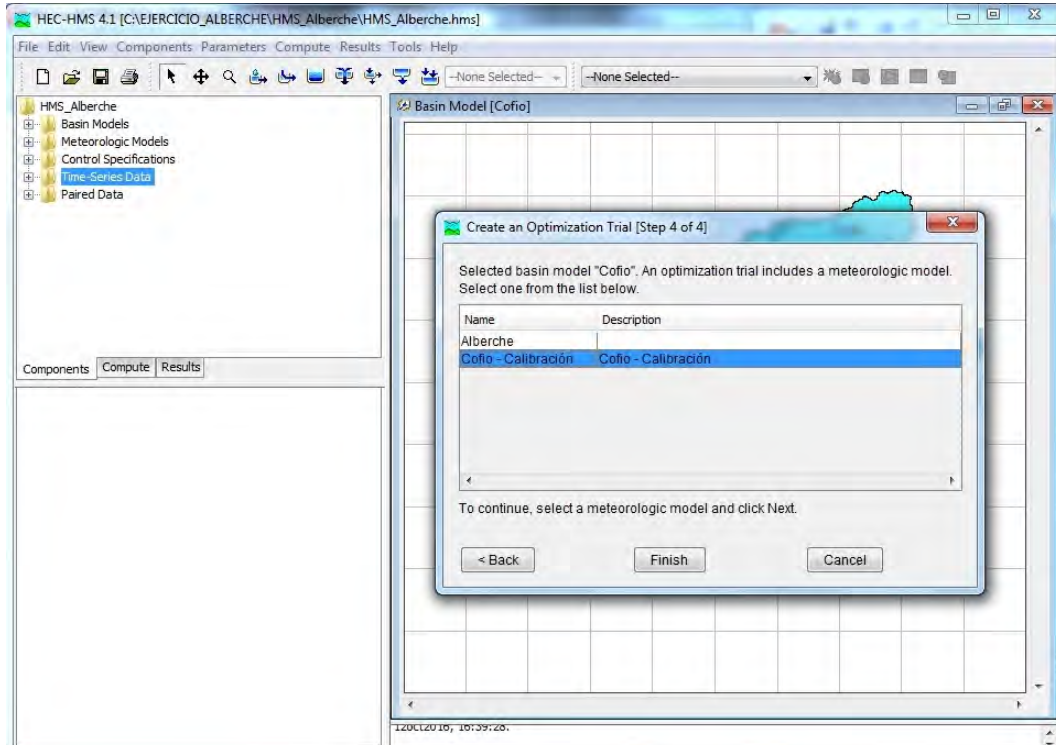
Seleccionamos el modelo de cuenca (Cofio).



Seleccionamos el punto donde se ha registrado el caudal (Salida).

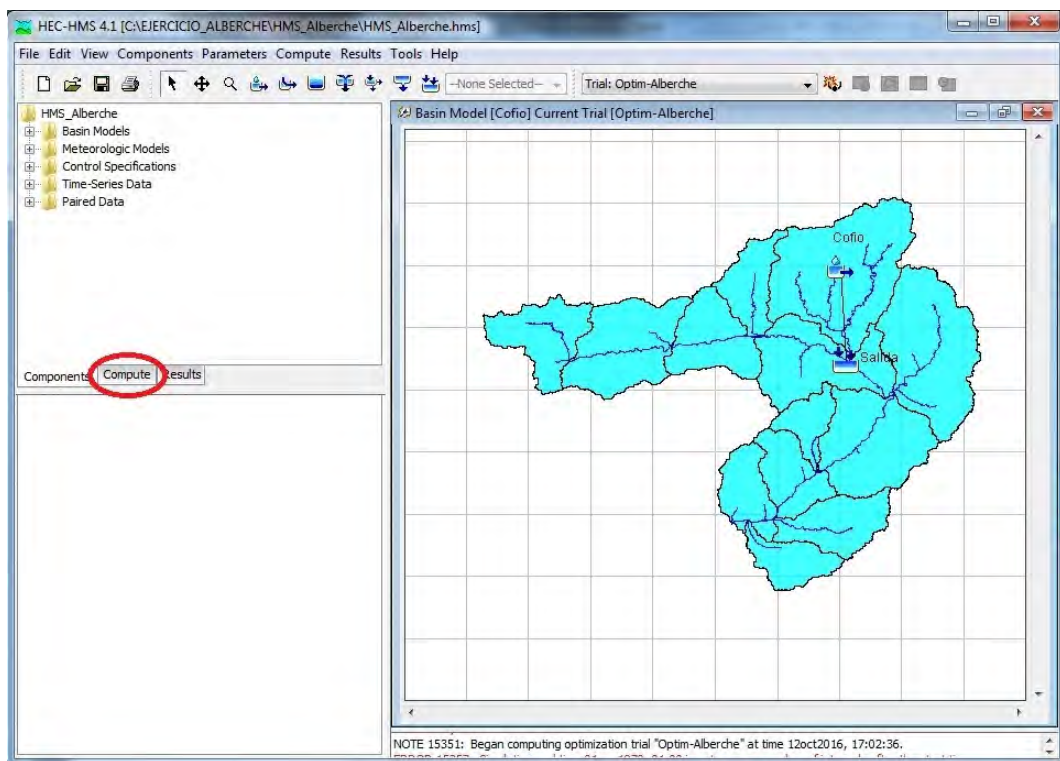


Seleccionamos el modelo meteorológico (Cofio-Calibración).



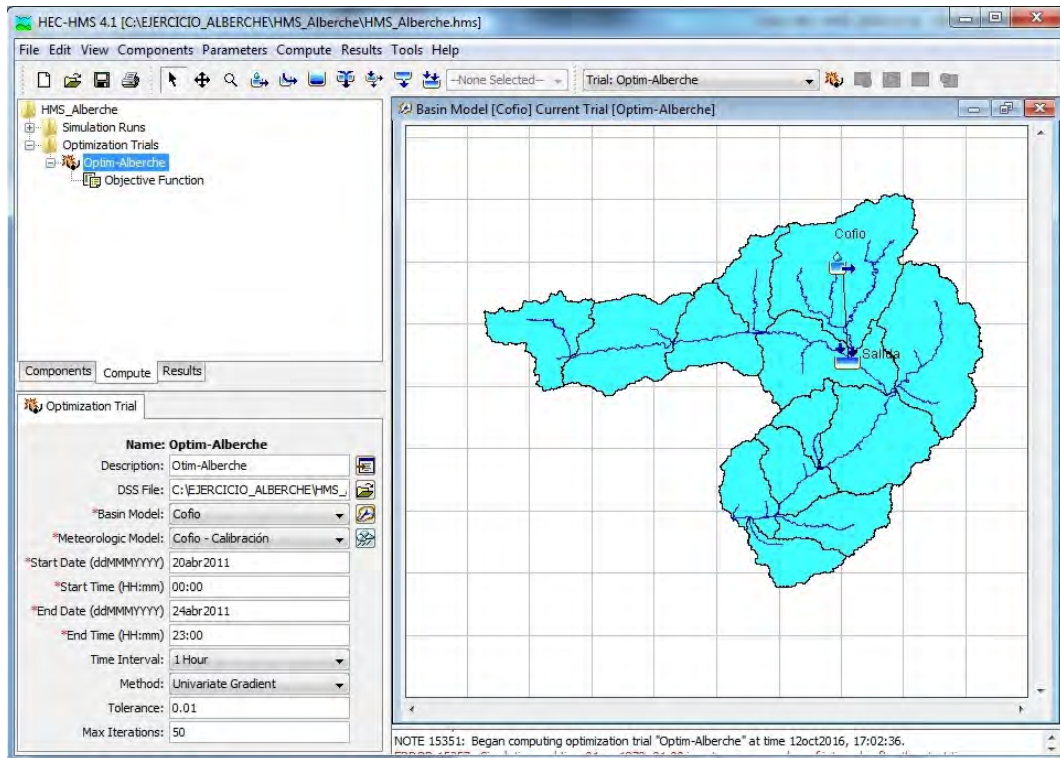
Paso 8. Definición de las opciones de calibración

Pinchamos sobre la pestaña *Compute* para acceder al menú de Calibración.



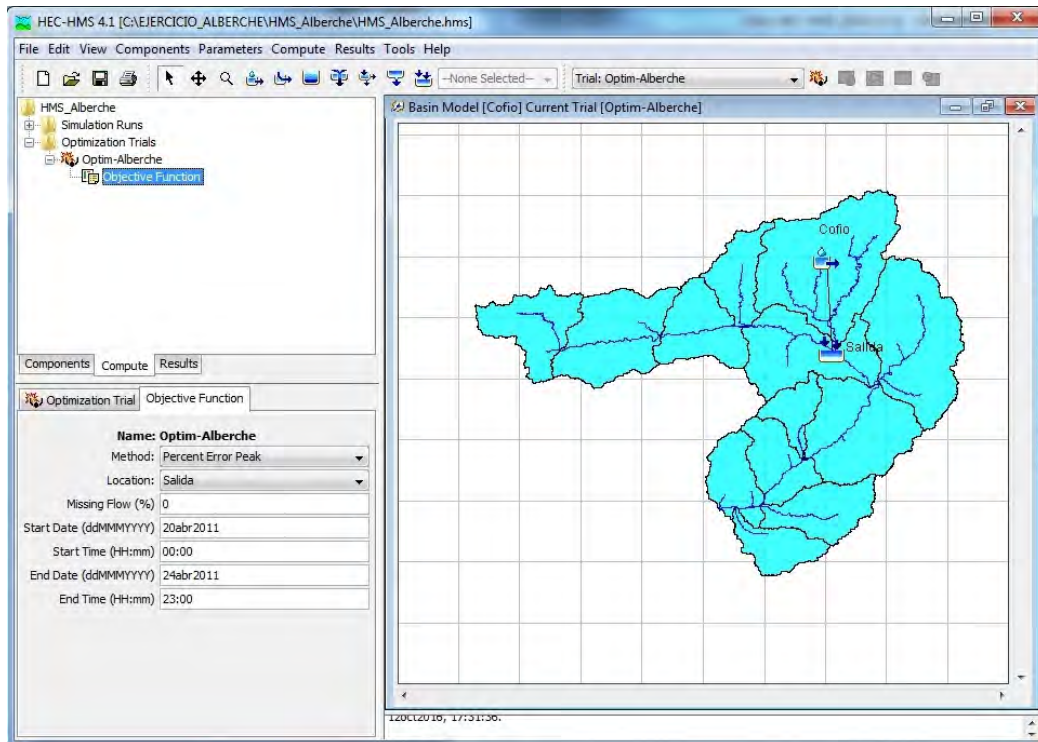
En la pestaña *Optimization Trial* se define:

- ✓ *Description*: es la descripción de la calibración.
- ✓ *DSS File*: dejamos la ruta que viene por defecto.
- ✓ *Basin Model*: seleccionamos el modelo de cuencas (Cofio).
- ✓ *Meteorologic Model*: seleccionamos el modelo meteorológico (Cofio-Calibración).
- ✓ *Start Date (ddMMYYYY)*: es la fecha de comienzo de la calibración. Ponemos como fecha el 20 de abril de 2011.
- ✓ *Start Time (HH:mm)*: es la hora de comienzo de la calibración. Dejamos la fecha que viene por defecto (00:00).
- ✓ *End Date (ddMMYYYY)*: es la fecha de finalización de la calibración. Ponemos como fecha el 24 de abril de 2011.
- ✓ *End Time (HH:mm)*: es la hora de finalización de la calibración. Ponemos las 23:00.
- ✓ *Time Interval*: seleccionamos 1 Hour.
- ✓ *Method*: seleccionamos *Univariate Gradient*.
- ✓ *Tolerance*: dejamos el valor que viene por defecto (0.01).
- ✓ *Max Iterations*: dejamos el valor que viene por defecto (50).



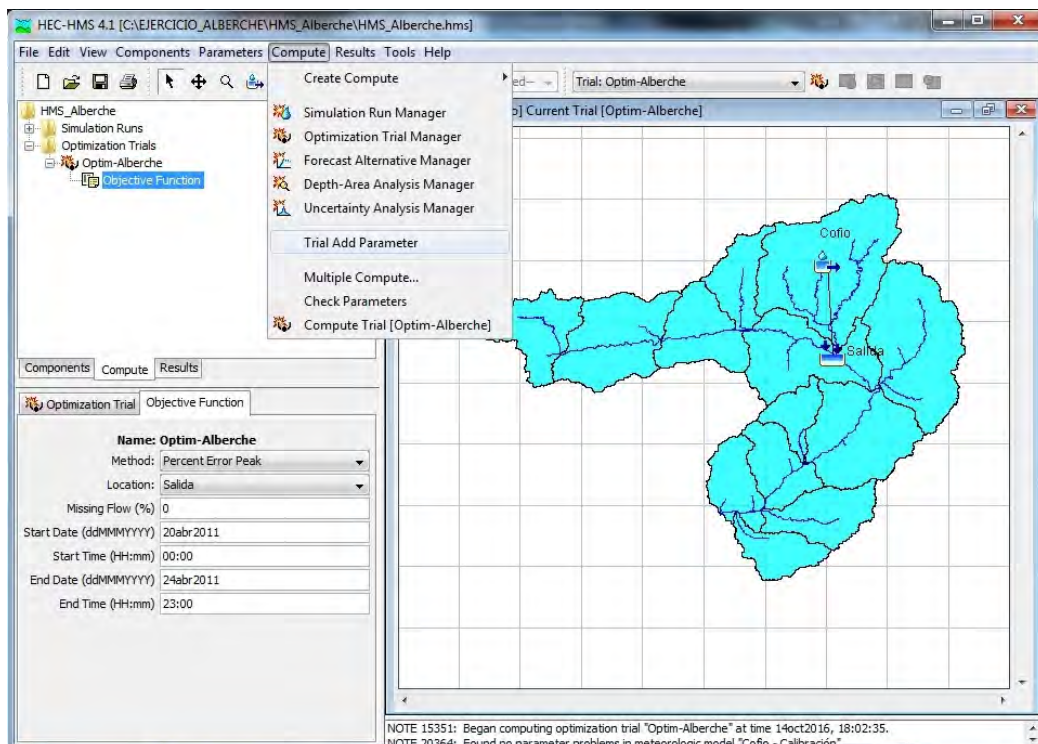
En la pestaña *Objective Function* se define:

- ✓ *Method*: seleccionamos *Percent Error Peak*.
- ✓ *Location*: seleccionamos *Salida*.
- ✓ *Missing Flow (%)*: ponemos 0.
- ✓ *Start Date (ddMMYYYY)*: es la fecha de comienzo de la calibración. Ponemos como fecha el 20 de abril de 2011.
- ✓ *Start Time (HH:mm)*: es la hora de comienzo de la calibración. Dejamos la fecha que viene por defecto (00:00).
- ✓ *End Date (ddMMYYYY)*: es la fecha de finalización de la calibración. Ponemos como fecha el 24 de abril de 2011.
- ✓ *End Time (HH:mm)*: es la hora de finalización de la calibración. Ponemos las 23:00.



Paso 9. Definición del parámetro a optimizar

Compute → Trial Add Parameter

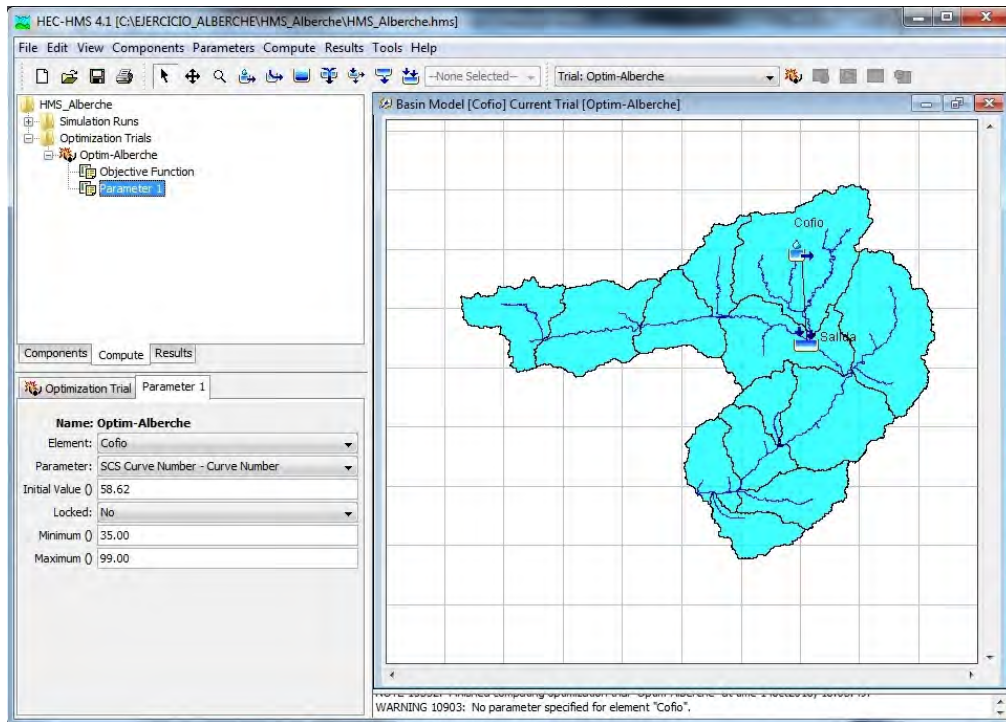


En este caso vamos a realizar la calibración según el número de curva.

En la pestaña *Parameter 1* se define:

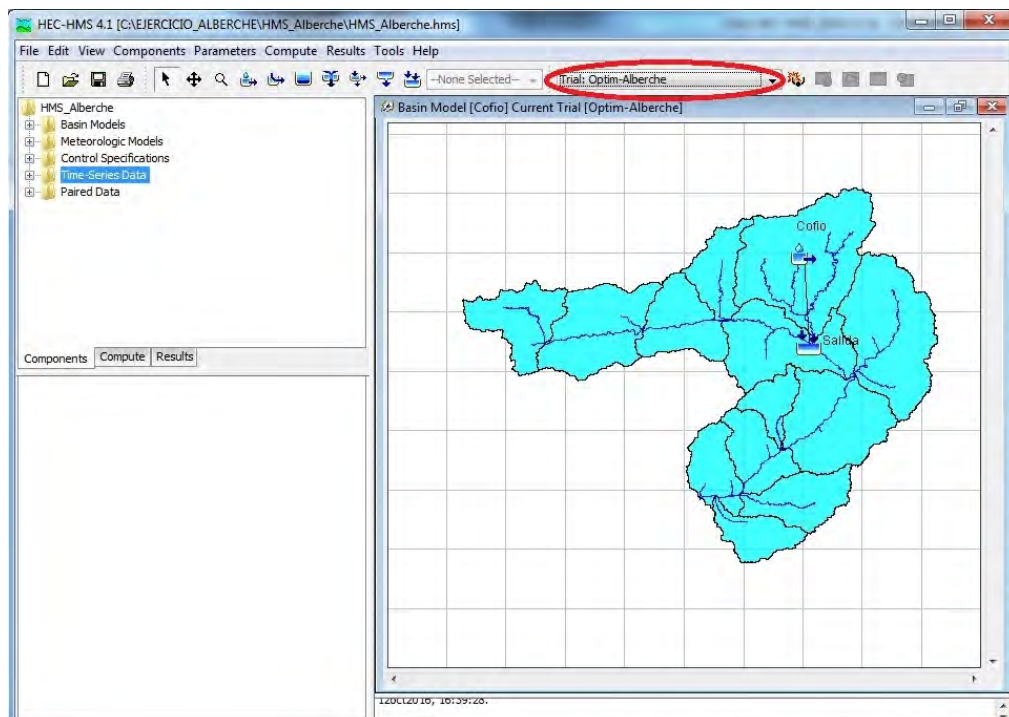
- ✓ *Element*: seleccionamos Cofio.

- ✓ *Parameter*: seleccionamos *SCS Curve Number - Curve Number*.
- ✓ *Initial Value ()*: dejamos el valor inicial del número de curva (58.62).
- ✓ *Locked*: seleccionamos No.
- ✓ *Minimum*: dejamos el valor que viene por defecto.
- ✓ *Maximum*: dejamos el valor que viene por defecto.




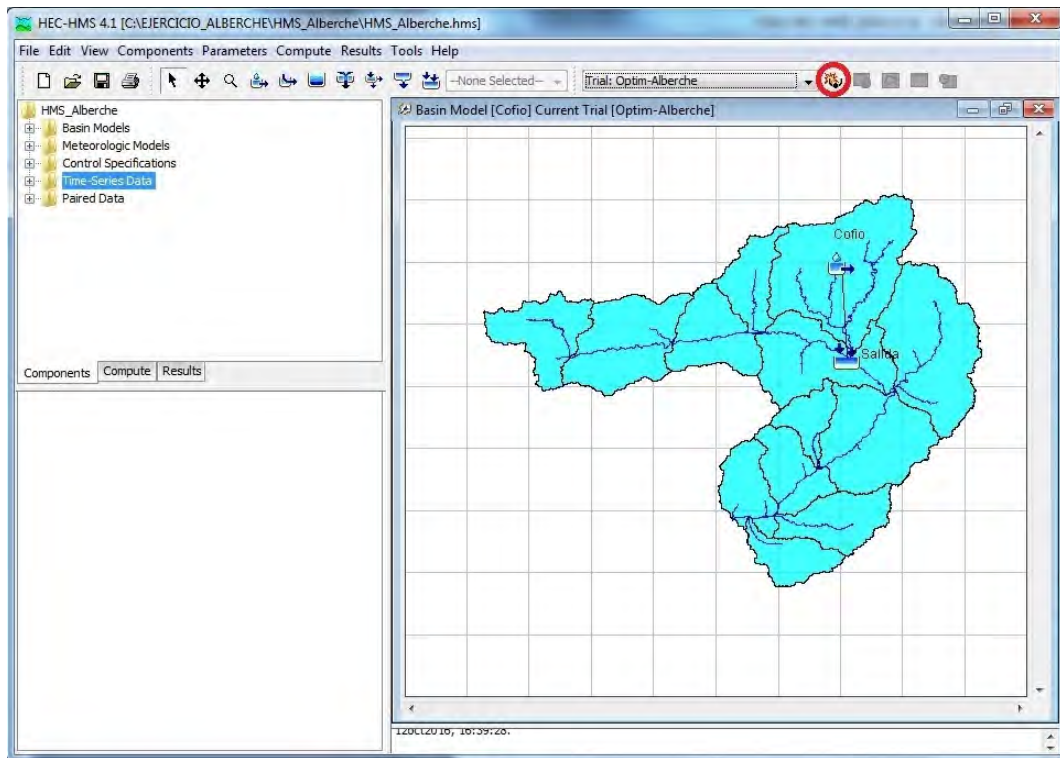
Paso 10. Selección de la calibración

En el desplegable indicado a continuación se selecciona la calibración generada.



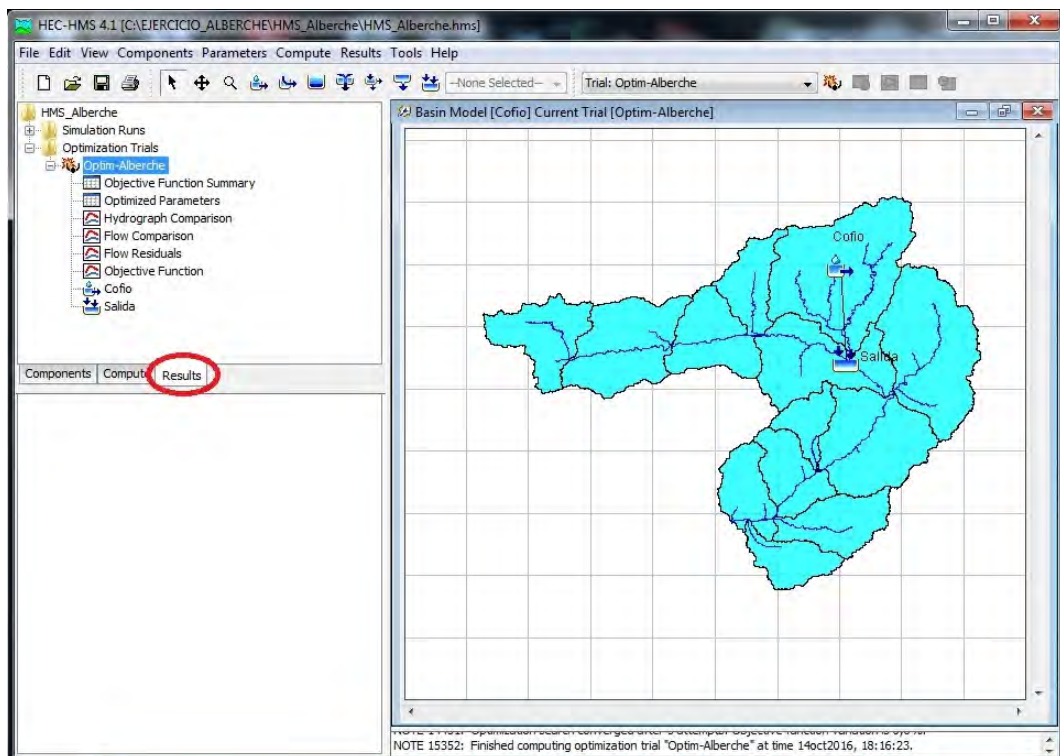
Paso 11. Calibración

Pinchamos sobre .

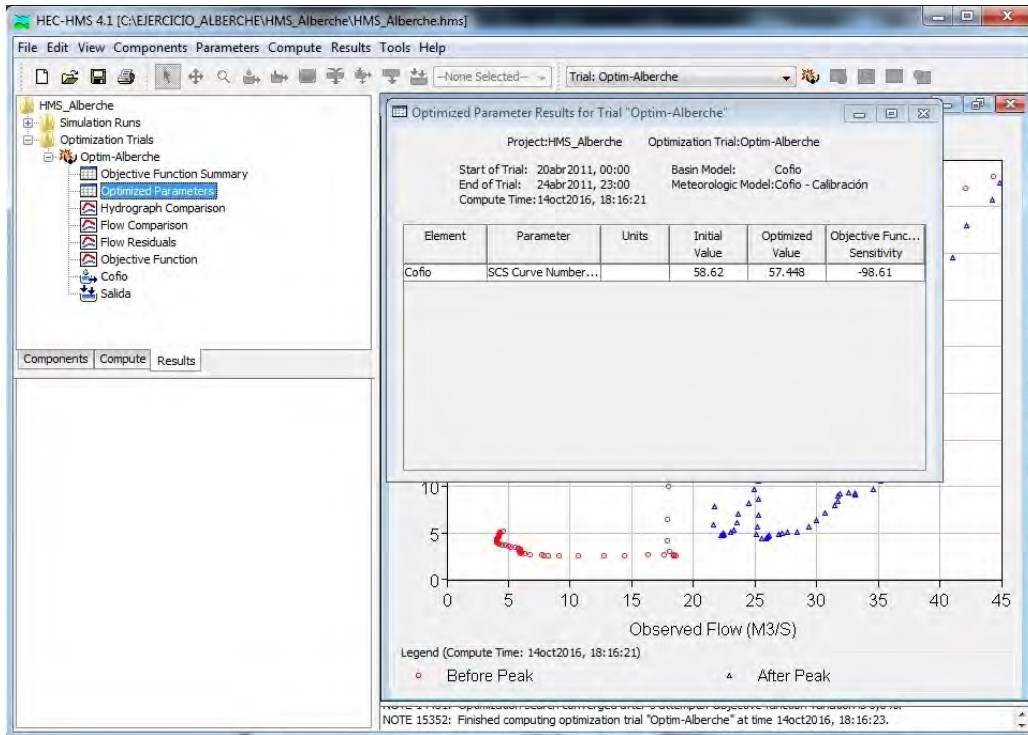


Paso 12. Consulta de los resultados

En la pestaña *Results* se pueden observar los resultados de la calibración de diferentes maneras.

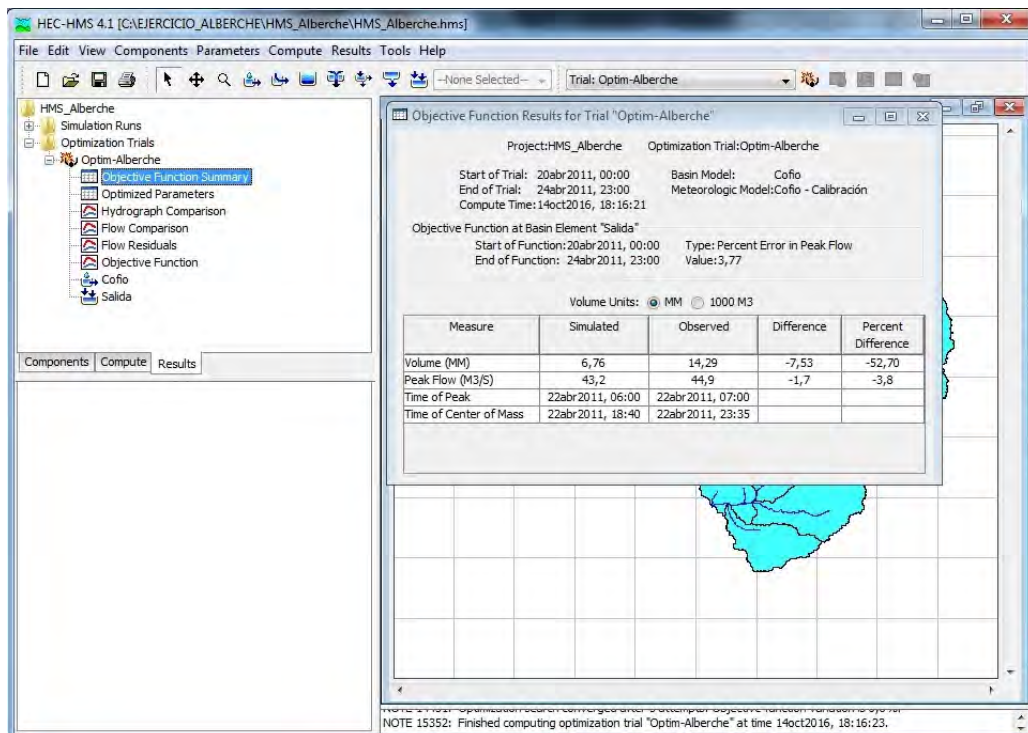


La tabla *Optimized Parameters* nos da el valor inicial del número de curva y el optimizado.

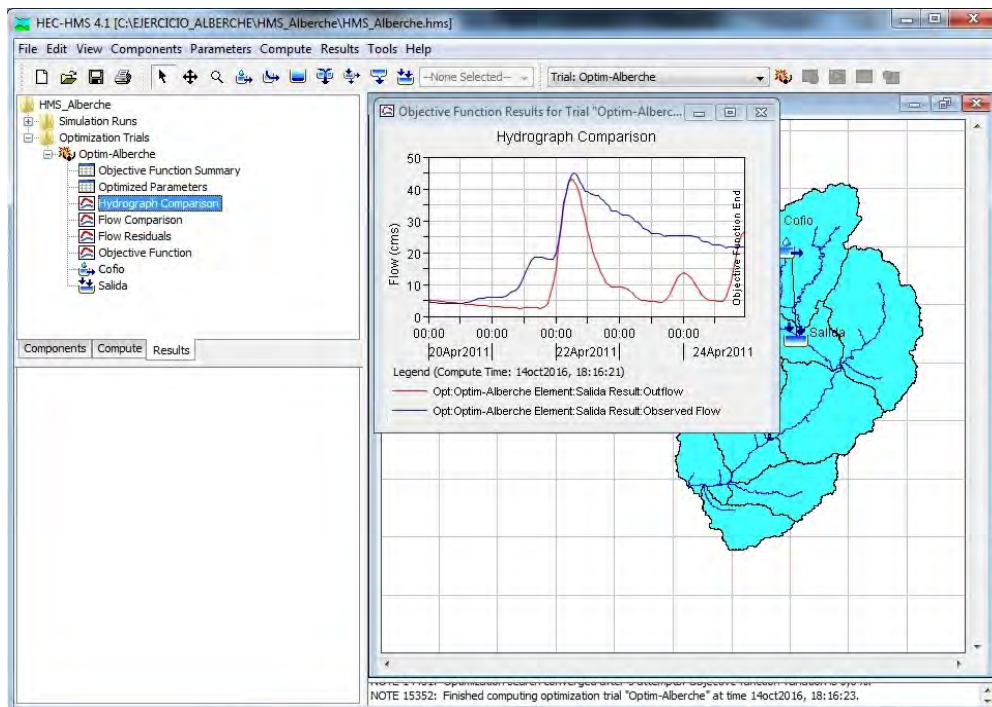


En este caso, la calibración nos dice que deberíamos reducir ligeramente el número de curva para conseguir un ajuste óptimo. Pero debido a la escasa diferencia entre el número de curva estimado y el calculado, se ha decidido no modificar el valor.

También se pueden observar los resultados de la calibración en términos de caudal, ya sea numéricamente, en la tabla *Objective Function Summary*.



O en forma de hidrograma, en el gráfico *Hydrograph Comparison*.

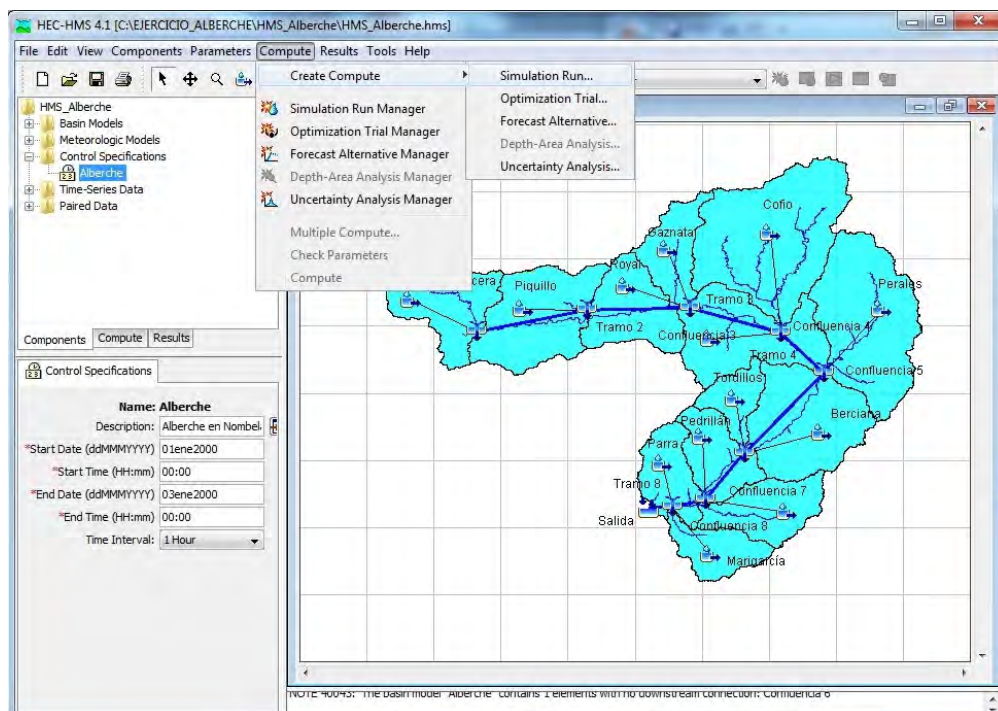


9. Simulación

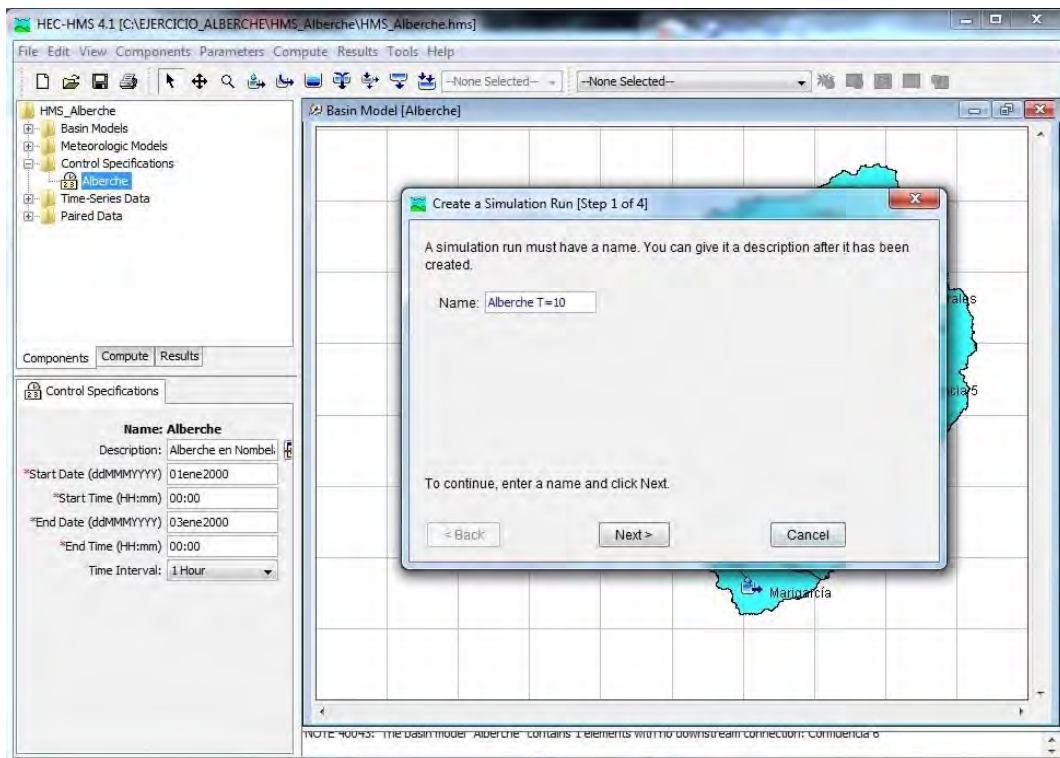
Como hemos decidido no modificar el número de curva inicialmente estimado, no es necesario realizar ninguna modificación en el modelo de cuencas. Si se decidiese modificar este valor, habría que ir cambiándolo en cada una de las subcuencas.

Paso 1. Creación de la simulación

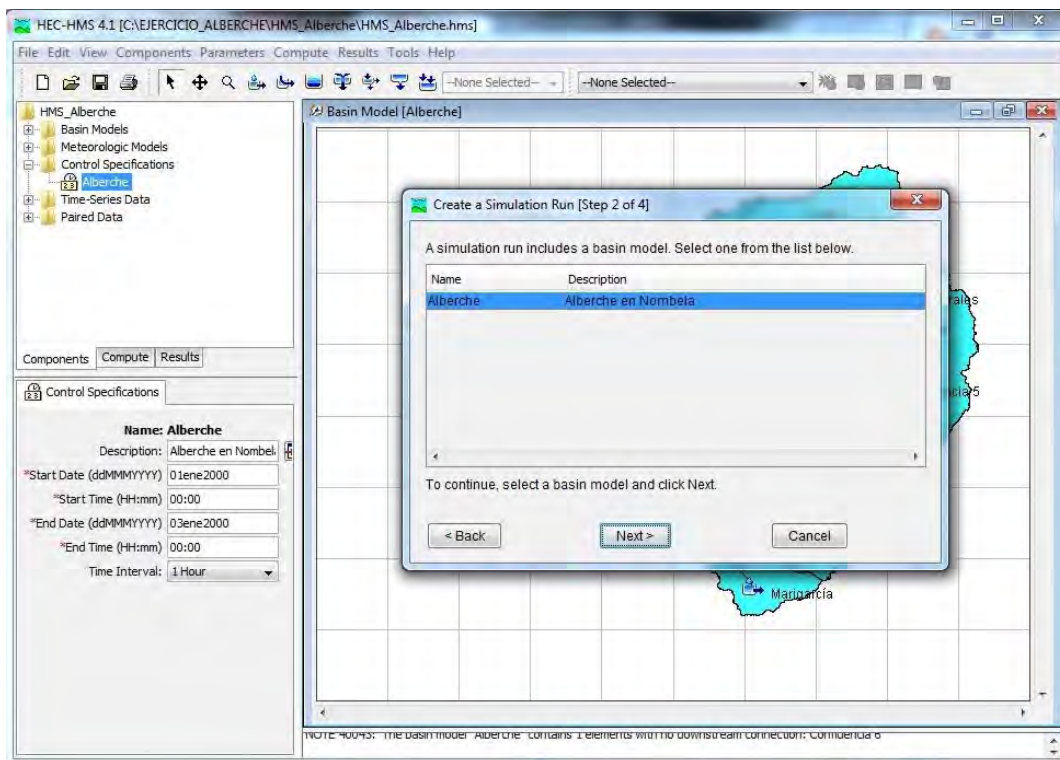
Compute → Create Compute → Simulation Run...



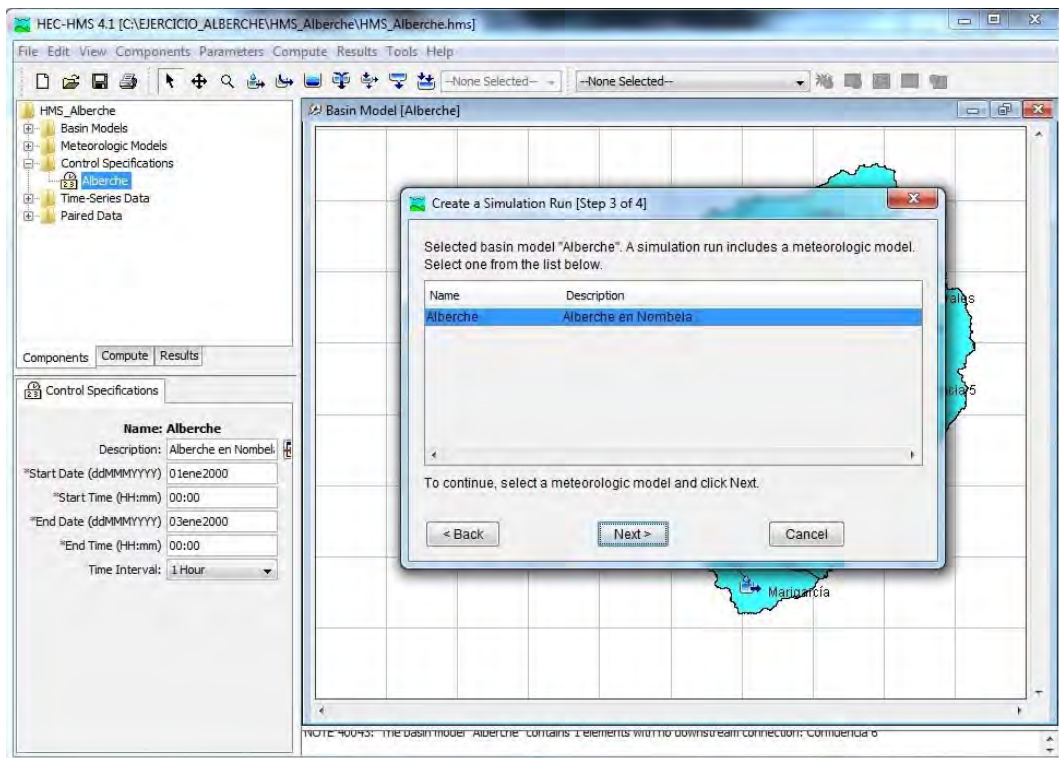
Damos nombre a la simulación (Alberche T=10).



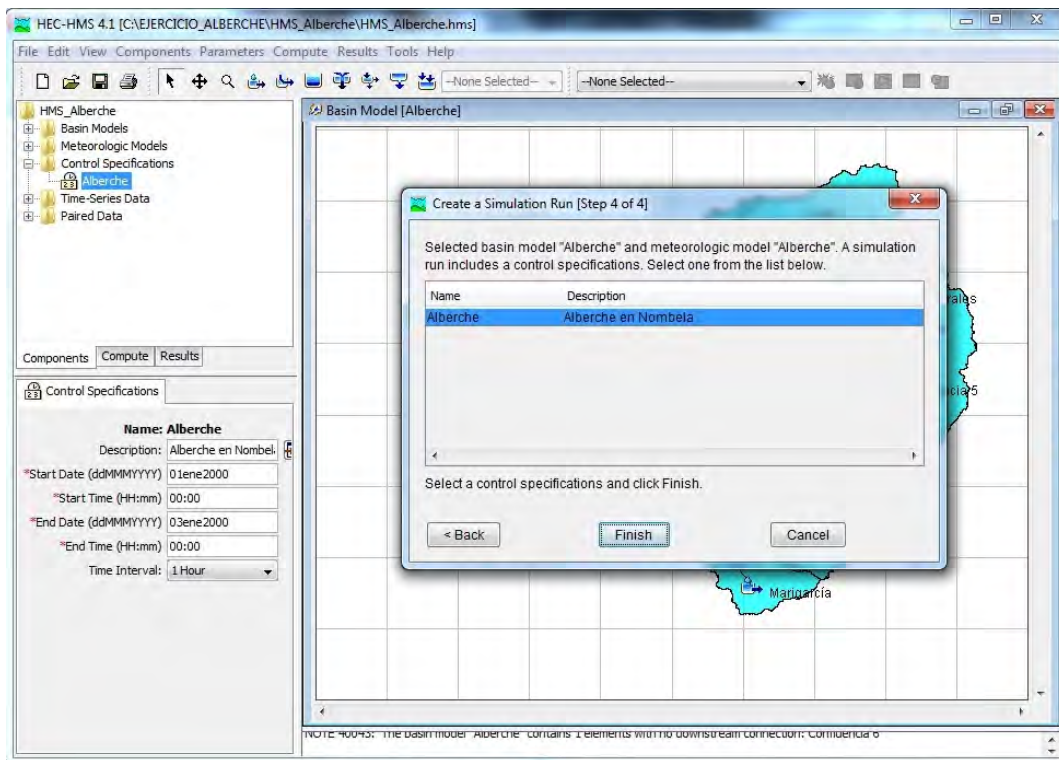
Seleccionamos el modelo de cuenca (Alberche).



Seleccionamos el modelo meteorológico (Alberche).

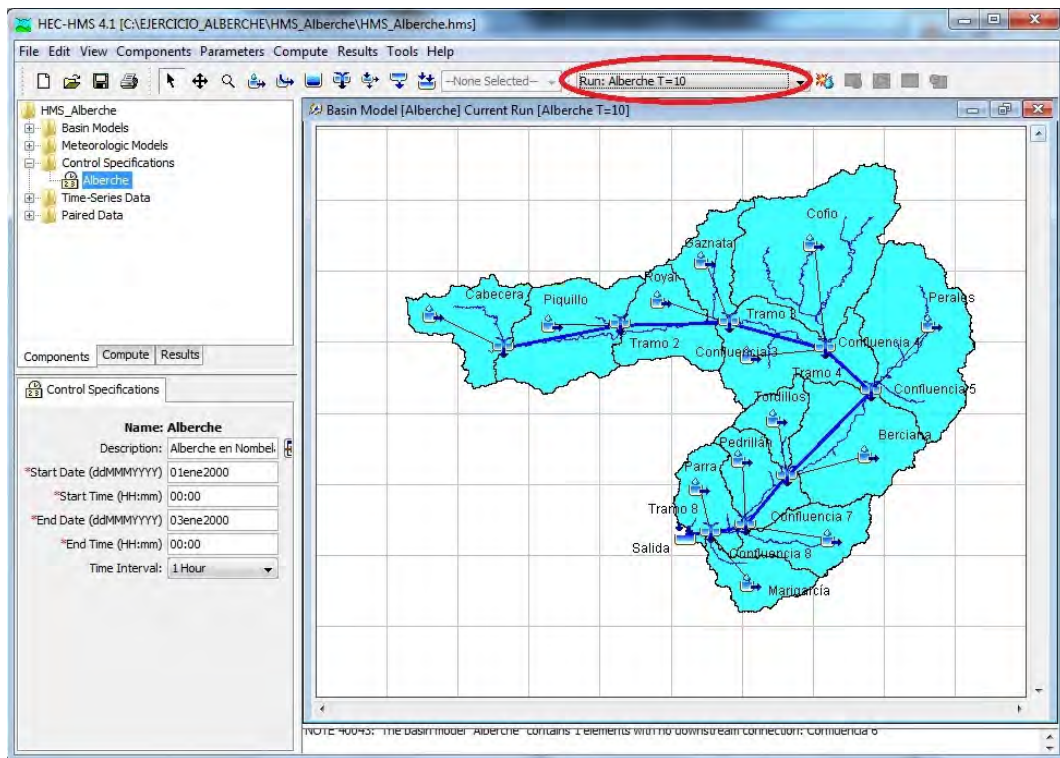


Seleccionamos las especificaciones de control (Alberche).




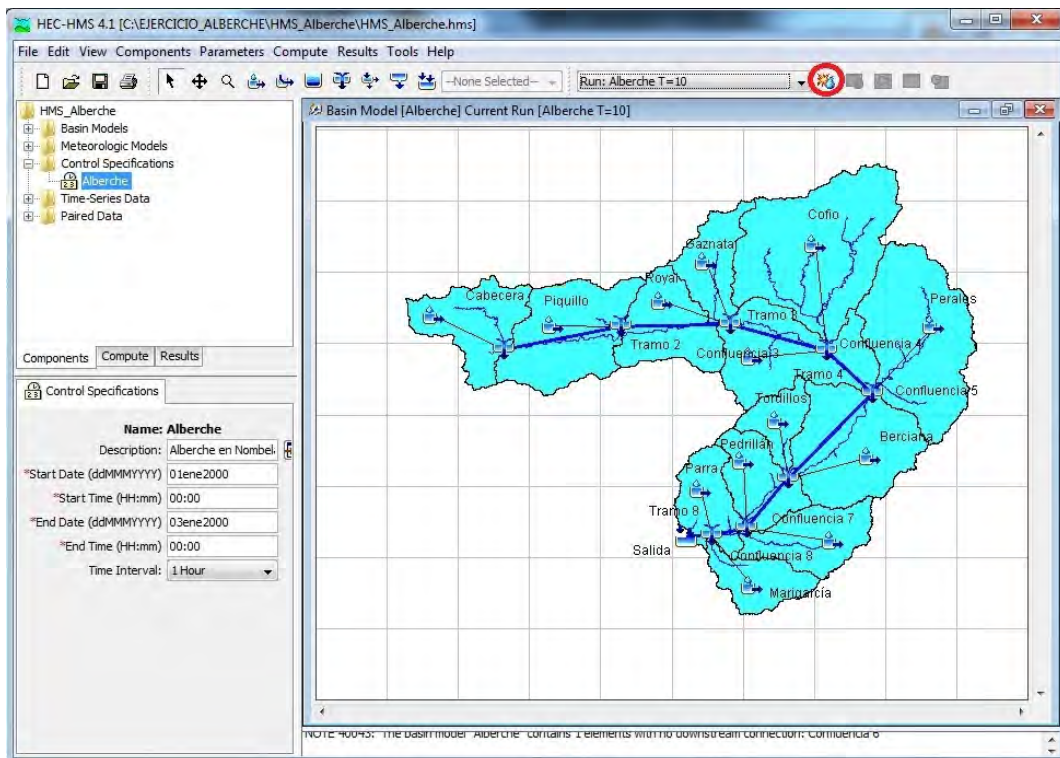
Paso 2. Selección de la simulación

En el desplegable indicado a continuación se selecciona la simulación generada.



Paso 3. Simulación

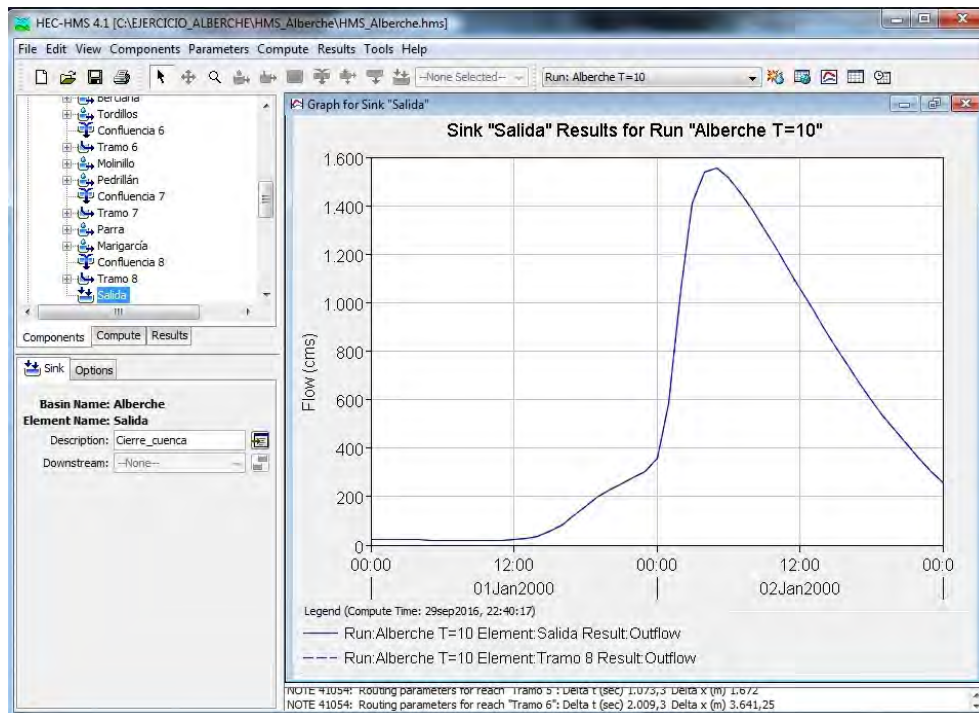
Pinchamos sobre .



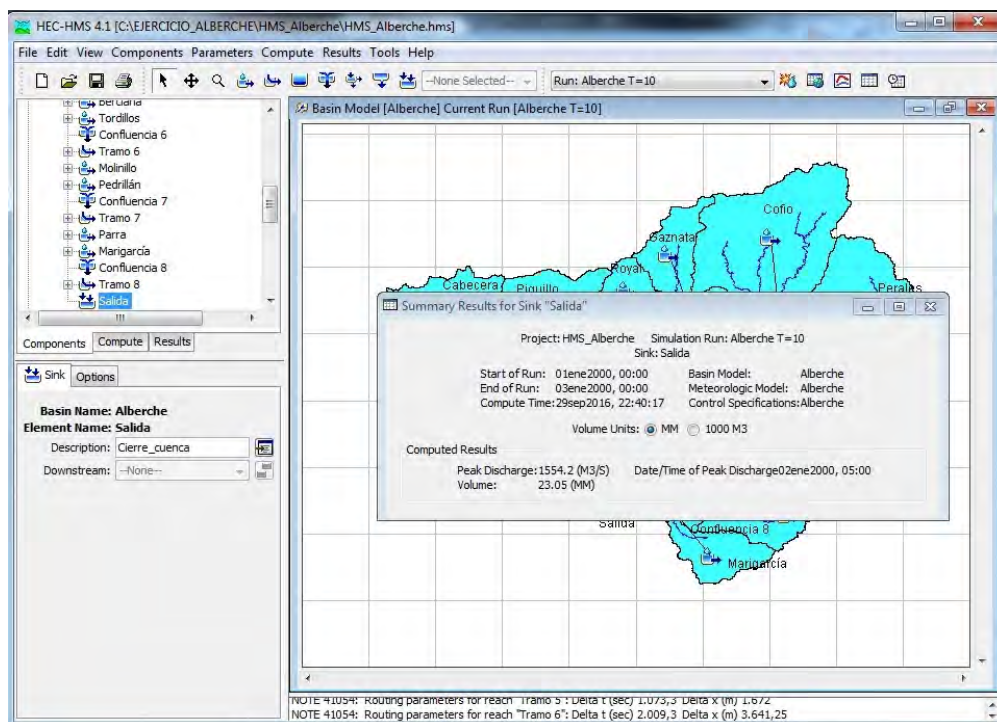
Paso 4. Consulta de los resultados

Pinchando en el mapa sobre cada uno de los elementos, ya sean subcuencas, tramos, confluencias o salida, podemos observar los resultados obtenidos. El programa permite consultar los resultados en forma de hidrograma o numéricamente. En este caso, como queremos calcular el caudal en el cierre de la cuenca, pinchamos sobre el elemento Salida.

Para ver los resultados en forma de hidrograma pinchamos sobre 



Y para ver los resultados en forma numérica pinchamos en 



10. Reflexiones finales

Los modelos hidrológicos son herramientas muy útiles para predecir el comportamiento de las cuencas frente a las precipitaciones, pero no debemos olvidarnos que no son más que aproximaciones basadas simulaciones, estadísticas y suposiciones y que, por tanto, los resultados obtenidos en el modelo no coincidirán perfectamente con los caudales registrados para una misma tormenta. Como es lógico, cuanto más se afine en el método para obtener los diferentes parámetros hidrológicos, más preciso será el modelo. Así, por ejemplo, cuanto mayor sea la discretización del terreno para obtener el número de curva, más próximo se estará del valor real. En este sentido, la elección de una escala de trabajo adecuada es fundamental para obtener unos resultados aceptables.

Del mismo modo, para obtener unos buenos resultados, es necesario utilizar una información de partida lo más actual posible y con la suficiente calidad y resolución para que refleje la situación real de la cuenca. El empleo de mapas de usos del suelo antiguos puede originar resultados muy diferentes a los esperados debido a los cambios que el hombre haya podido introducir en el terreno.

Por otro lado, para dar por bueno el modelo es imprescindible realizar la calibración del mismo, ya sea de la cuenca completa o de una parte de la misma. Con la calibración se realizan los ajustes necesarios para adaptar los resultados obtenidos a los registrados. Además, es importante la selección de la tormenta adecuada, ya que, en ciertos casos, pueden darse errores en el registro de los datos que hacen que la calibración no sea posible. Por tanto, debe realizarse un tanteo entre las diferentes tormentas registradas disponibles y seleccionar la que mejor se ajuste al modelo.

Otro aspecto importante a tener en cuenta a la hora de elaborar los modelos hidrológicos son las actuaciones antrópicas, como embalses, derivaciones, aportes, etc., que deben quedar perfectamente definidas, lo que puede suponer una complejidad excesiva debido a las múltiples maniobras de regulación que se pueden llevar a cabo. En sentido contrario se encuentran los modelos en régimen natural, como el del ejercicio práctico. Dentro de estos modelos destacan los que tienen por finalidad la definición del dominio público hidráulico, que deben despreciar cualquier infraestructura existente en el cauce.

El ejemplo que se ha utilizado para realizar el autoaprendizaje se ajusta a los requerimientos de datos y las necesidades de trabajo del modelo hidrológico HEC-HMS sobre las características de una cuenca real para que sea fiable en su aplicación, siguiendo todos los pasos y protocolos requeridos en su secuencia de modelado. Eso nos pone ante un aspecto crucial de los modelos hidrológicos, que es su elección. Se puede decir que no hay modelos buenos, malos, o mejores. Sobre todo se trata de saber de antemano para qué queremos aplicar la modelización, las propiedades reales de la cuenca en la que se va a desarrollar la modelización, los datos con los que se cuenta, la pericia y conocimiento hidrológico de las personas que van a estar involucradas en el proceso y las características del modelo (o modelos). Si se tiene en cuenta todos esos factores, se

garantiza la optimización de la aplicación de un modelo hidrológico, su eficacia suficiente, y, sobre todo, la mejor comprensión de los resultados obtenidos.

11. Bibliografía

- AGENCIA EUROPEA DE MEDIO AMBIENTE (2006). Mapa de usos del suelo CORINE *Land Cover*. Escala 1:100.000.
<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/buscadorCatalogo.do?codFamilia=02113>
- AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA (2016). Datos de precipitaciones máximas diarias mensuales.
- BOE (2016a). Orden FOM/298/2016, de 15 de febrero, por la que se aprueba la norma 5.2 - IC drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras. Boletín Oficial del Estado núm. 60, de 10 de marzo de 2016.
- BOE (2016b). Resolución de 30 de diciembre de 2015, de la Agencia Estatal de Meteorología, por la que se establecen los precios públicos que han de regir la prestación de servicios meteorológicos y climatológicos. Boletín Oficial del Estado núm. 4, de 5 de enero de 2016
- CEDEX (2013). Manual de CHAC (Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas).
- CHOW, V. (1994). Hidráulica de canales abiertos. McGraw-Hill.
- CENTRO NACIONAL DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (2009). Modelo Digital del Terreno 25 m. Plan Nacional de Ortofotografía Aérea.
<http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/buscadorCatalogo.do?codFamilia=02107>
- CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL TAJO (2016). Red hidrográfica principal de la parte española de la Demarcación Hidrográfica del Tajo.
<http://www.chtajo.es/Servicios/Paginas/DescargaDCapas.aspx>
- FERRER, M., RODRÍGUEZ, J., ESTRELA, T. (1995). Generación automática del número de curva con sistemas de información geográfica. Ingeniería del Agua. Vol 2. Num. 4.
- FERRER, M., RUIZ, A., DIMAS, M., ESTRELA, T. (1998). Aportación de la teledetección para la determinación del parámetro hidrológico del número de curva. Ingeniería del Agua. Vol 5. Num. 1.
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER (2013). HEC-GeoHMS *Geospatial Hydrologic Modeling Extension. User's Manual. US Army Corps of Engineers.*
- HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER (2015). HEC-HMS. *Hydrologic Modeling System. User's Manual. US Army Corps of Engineers.*
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE (2016a). Sistema de Información Geográfica de Datos Agrarios (SIGA). Mapa de localización de estaciones meteorológicas. <http://sig.mapama.es/siga/>
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE (2016b). Sistema Integrado de Modelización Precipitación Aportación (SIMPA). Mapa de escorrentía total anual. <http://www.mapama.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/agua/simpa.aspx>
- MINISTERIO DE AGRICULTURA Y PESCA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE (2016c). Sistema Automático de Información Hidrológica (SAIH). Datos de precipitaciones y caudales registrados. <http://sig.mapama.es/saih/>

