

Modelación distribuida lluvia-escurrencimiento con el programa ATHYS

Aplicación a la cuenca del Gardon en Anduze

The image shows a screenshot of the ATHYS web interface and the software application. The web interface at the top features the HSM logo, the title 'ATelier HYdrologique Spatialisé', and the IRD logo. Below the title is a navigation menu with 'ACCUEIL', 'MODULES', 'TÉLÉCHARGEMENT', 'BD BASSINS', 'DOCUMENTATION', and 'CONTACT'. A login section includes fields for 'Nom d'utilisateur ou Adresse mail' and 'Mot de passe', with buttons for 'Connexion' and 'Créer un compte'. A sidebar on the right contains 'FAQ' and 'FORUM'.

The main content area of the website describes the software: 'L'ATelier HYdrologique Spatialisé, ATHYS, a pour objectif de réunir dans un environnement convivial et homogène un ensemble de modèles hydrologiques associés à des traitements de données hydro-climatiques et géographiques. Il a été développé à l'IRD pour des applications diverses : gestion de la ressource en eau, prévision des événements extrêmes, études d'impact liées à des modifications anthropiques ou climatiques.'

The software application 'ATHYS - IRD Hydrologie - Version 5.6' is shown in the foreground. It features a main menu with 'MERCEDES', 'VISHYR', 'VICAIR', and 'SPATIAL' buttons. The 'MERCEDES' window displays a 'Mélange Ensemble Multiple Caux pour l'Étude Des Ecoulements Superficiels' interface with a map and data input fields. The 'Vishyr' window shows a hydrograph plot. The 'VICAIR' window displays a topographic map with a color-coded watershed. The 'SPATIAL' window is titled 'Traitement de Données Spatialisées' and includes options for 'Analyse de Données' and 'Estimation'.



INDICE

Introducción	3
1. Generalidades sobre los modelos.....	4
1.1 Definiciones y objetivos	4
1.2 Tipos de modelos	6
1.3 Fundamentos de los modelos aplicados en ATHYS	10
1.4 Presentación detallada del modelo SCS-LR.....	12
1.4.1. Función de producción tipo SCS	12
1.4.2. Función de transferencia Lag and Route.....	15
2. Programa ATHYS	17
2.1. Instalación de ATHYS	18
2.2. Presentación de los datos	21
2.3. Introducción a VISHYR	26
2.4. Introducción a VICAIR.....	28
2.5. Introducción a MERCEDES	31
2.5.1. Menú 1: Cuenca vertedora	32
2.5.2. Menú 2: Lluvias y Caudales	35
2.5.3. Menú 3: Parámetros de los modelos	36
2.5.4. Menú 4: Optimización	40
2.5.5. Menú 5: Análisis de sensibilidad	42
2.5.6. Menú 6: Archivos de salida	44
2.6. Ejercicios de aplicación	46
3. Calibración del modelo SCS-LR	49
3.1. Sensibilidad de las avenidas a las incertidumbres sobre los parámetros	49
3.2. Calibración del modelo según las observaciones	50
3.3. Evaluación final del modelo	54
3.4. Consideración de la variabilidad por evento de un parámetro en MERCEDES	55
4. Impacto de la variabilidad espacial.....	58
4.1. Impacto de la organización espacial de la lluvia	58
4.2. Impacto de la variabilidad espacial de los suelos.....	60
4.3. Impacto de modificaciones climáticas o geográficas	63
4.4. Reflexiones sobre la selección de datos	65
4.4.1. Sensibilidad a la discretización espacial de la cuenca	65
4.4.2. Sensibilidad a la resolución espacial de las lluvia de radar	66
5. Aplicación del modelo de la onda cinemática (transferencia)	70
5.1. Presentación del modelo	70
5.2. Aplicación a la simulación del impacto de represas	72
6. Aplicación del modelo de Green & Ampt (producción).....	79
7. Aplicación de Topmodel.....	84
8. Preparación de los datos	87
8.1. Preparación de los datos geográficos	87
8.2. Preparación de los datos hidro-pluviométricos	93
9. Organización del programa y compilación	97
10. Referencias bibliograficas	99

Introducción

El presente manual es un tutorial para la utilización de modelos hidrológicos distribuidos con el programa ATHYS. El programa ATHYS propone un entorno homogéneo y amigable, con el fin de facilitar el uso de los modelos distribuidos, de comparar sus rendimientos o sus adecuaciones a las aplicaciones consideradas – recursos, riesgo o estudio de impacto ambiental – sobre cuencas diversas. ATHYS contiene 4 módulos, de los cuales 3 están presentados en este manual; la plataforma de modelación Mercedes, el módulo de tratamiento de crónicas hidro-meteorológicas Vishyr y el módulo de tratamiento de los datos geográficos espaciales Vicair.

Más allá del lado técnico representado por el programa, el manual de formación tiene también como objetivo el sensibilizar en el uso de la modelación lluvia-escurrimiento en general, y distribuida en particular. Se encontrará entonces un recuerdo (para algunos) o una introducción (para los demás) acerca de la modelación, así como la descripción de diferentes modelos, y en cierta medida, de sus ventajas o de sus inconvenientes. Las preguntas sobre la utilidad y los límites de los modelos espaciales - ¿Qué discretizar, o no discretizar, qué se gana con ello? – esto se ilustra mediante diferentes ejemplos, los cuales permiten enriquecer la reflexión sobre la modelación hidrológica.

Nota 1: este manual fue escrito por Christophe Bouvier, hidrólogo del IRD en HydroSciences Montpellier. Anne Crespy (IRD), Agnès Crès (IRD), François-Noël Crès (Polytech’Montpellier), también contribuyeron a su realización, por medio de sus intervenciones en la redacción del manual o en el desarrollo del programa ATHYS. La traducción en español se realizó bajo la responsabilidad de la Maestra Delva Guichard con la ayuda del Dr. Miguel A. Aguilar Suárez y el M.I. Pierre Poirier, de la Universidad Autónoma de Chiapas, México. Este manual podrá ser citado bajo la referencia:

Christophe Bouvier, Anne Crespy, Agnès Crès, François-Noël Crès, Delva Guichard¹, Miguel A. Aguilar Suárez¹, Pierre Poirier¹, 2020. Modelación distribuida lluvia-escurrimiento con el programa ATHYS. Aplicación a la cuenca del Gardon en Anduze. Manual de formación, HydroSciences Montpellier, 102 paginas

Nota 2: después de la instalación del programa ATHYS, el usuario tendrá acceso a una documentación en forma de páginas HTML, que caben más información técnica y completan el presente documento de manera muy útil.

Nota 3: el desarrollo del programa ATHYS no habría sido posible sin los apoyos del *Ministère de l’Environnement et du Développement Durable*² y del *Service Hydrométéorologique d’Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI)*³, los cuales ayudaron en el financiamiento del proyecto, participaron en las orientaciones científicas y técnicas, y suministraron la mayoría de los datos utilizados en este manual.

Nota 4: La información y los resultados presentados en este manual tienen principalmente un valor pedagógico, y no deben ser considerados como resultados científicos definitivos y rigurosos. Los autores no pueden ser considerados responsables de cualquier utilización del manual que no sea pedagógica.

¹ Universidad Autónoma de Chiapas, UNACH, Facultad de Ingeniería.

² Secretaria del Medio Ambiente y del Desarrollo Durable (N. del T.).

³ Servicios Hidro-meteorológicos de Apoyo a la Previsión de las Inundaciones (SHAPI) (N. del T.).

1. Generalidades sobre los modelos

1.1 Definiciones y objetivos

¿Qué es un modelo matemático?

“Conjunto de ecuaciones que dan cuenta de un fenómeno complejo y que permiten describir sus características y prever sus evoluciones”

En el caso de un modelo lluvia-caudal, este conjunto de ecuaciones vincula las variables de entrada (ej. las lluvias) con las variables de salida (o de pronóstico, ej. los caudales), tomando en cuenta los variables de estado (o variables internas, ej. humedad de la cuenca, crecimiento de la vegetación, nivel de llenado de las presas...) del sistema.

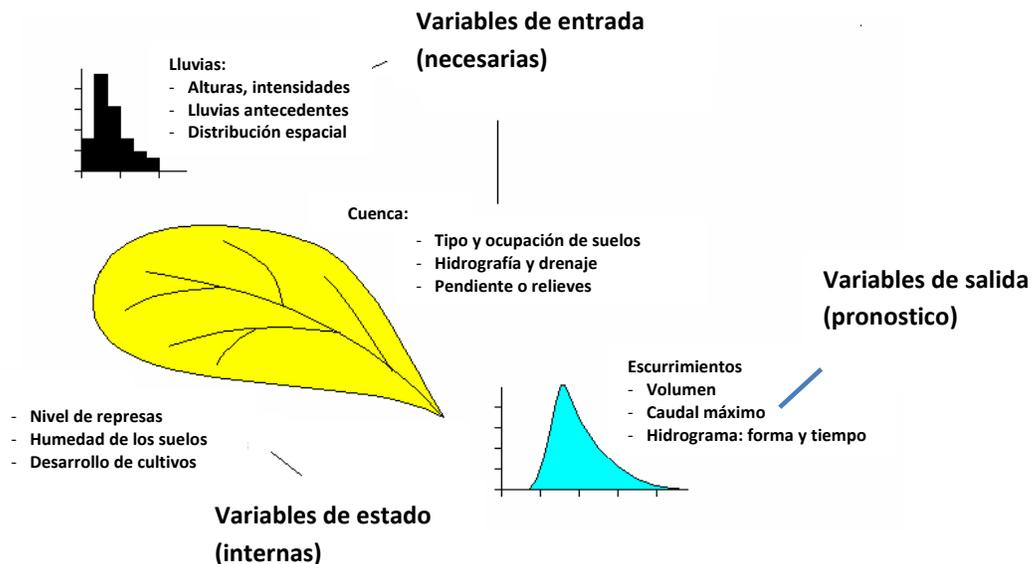


Figura 1.1

Un modelo lluvia-caudal está generalmente constituido de una función de producción (transformación de la precipitación en lluvia efectiva, en exceso o neta, disponible para el escurrimiento) y de una función de transferencia (lleva la lluvia efectiva a la salida, y reconstituye la dinámica de la avenida).

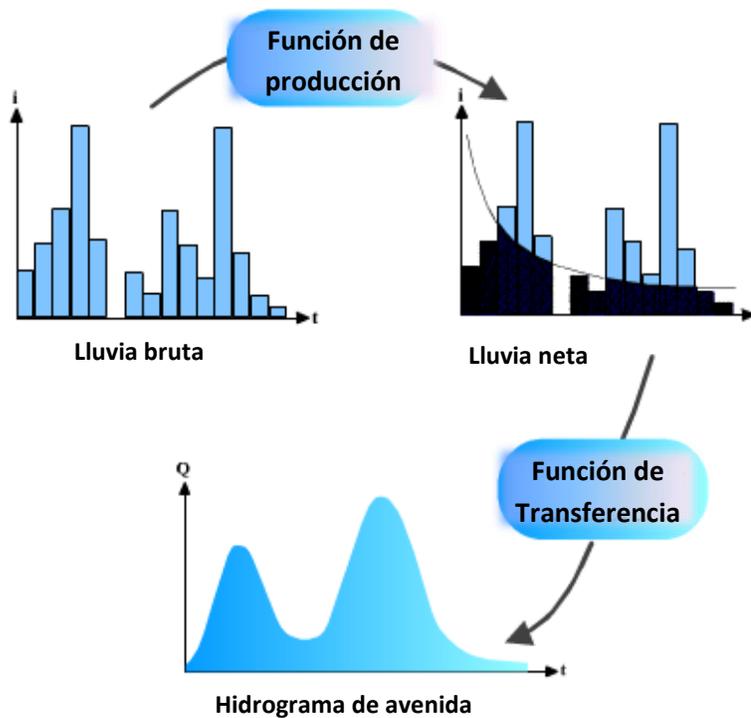


Figura 1.2 (Fuente: <http://hydram.epfl.ch/e-drologie>)

En una visión muy simplificada, un modelo lluvia-escorrimento consiste en estimar un coeficiente de escurrimiento (eventualmente variable en el tiempo y en el espacio) y una velocidad de escurrimiento (que puede también variar en el tiempo y en el espacio).

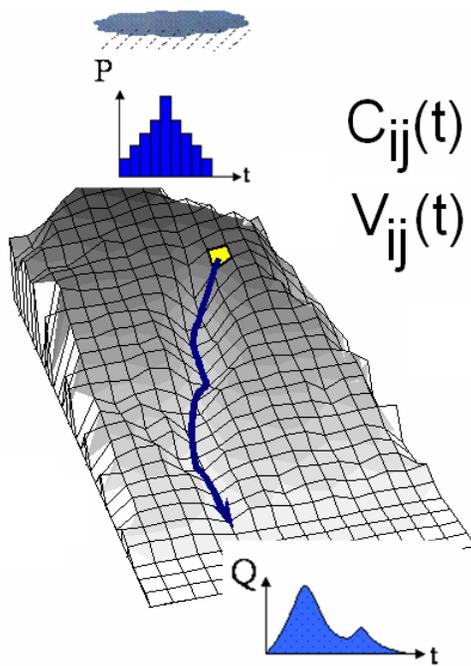


Figura 1.3

¿Para qué sirve un modelo lluvia-caudal?

Los caudales de los ríos son datos relativamente escasos y difíciles de medir. Las lluvias son más fáciles de medir y de acceso más sencillo, sea en tiempo real o diferida. Los modelos lluvia-caudal tienen entonces como primera función el simular caudales con ayuda de los valores de lluvia disponibles o verosímiles. Por extensión, un modelo lluvia-escurrimiento tiene como función simular los caudales de los ríos en todas las situaciones que escapan (a menudo) a la observación:

- Cálculo de los caudales extremos
- Cálculo de los caudales en una cuenca no aforada
- Previsión de los caudales hasta diferentes horizontes de tiempo
- Impacto sobre los caudales por la modificación del clima o de la cuenca

Un modelo lluvia-escurrimiento ofrece igualmente la posibilidad de probar hipótesis sobre los procesos hidrológicos. Por ejemplo, se puede imaginar un funcionamiento hidrológico, formalizarlo con un modelo, y confrontar este esquema con las observaciones disponibles de lluvia y caudal. En caso de no haber ajuste, se rechazarán las hipótesis escogidas (suponiendo que las observaciones son confiables). En caso de éxito, se podrá concluir que las hipótesis escogidas determinan un escenario posible.

1.2 Tipos de modelos

Los modelos lluvia-caudal son numerosos, pero pueden ser agrupados en grandes familias, dentro de las cuales las propiedades de los modelos son relativamente similares:

- Según la naturaleza de las ecuaciones que intervienen en el modelo, y el vínculo más o menos fuerte con la física de los procesos: modelos empíricos (regresiones, redes neuronales), “conceptuales” (modelos con tanques), o “físicamente basados” (apoyándose sobre las ecuaciones de la mecánica de fluidos);

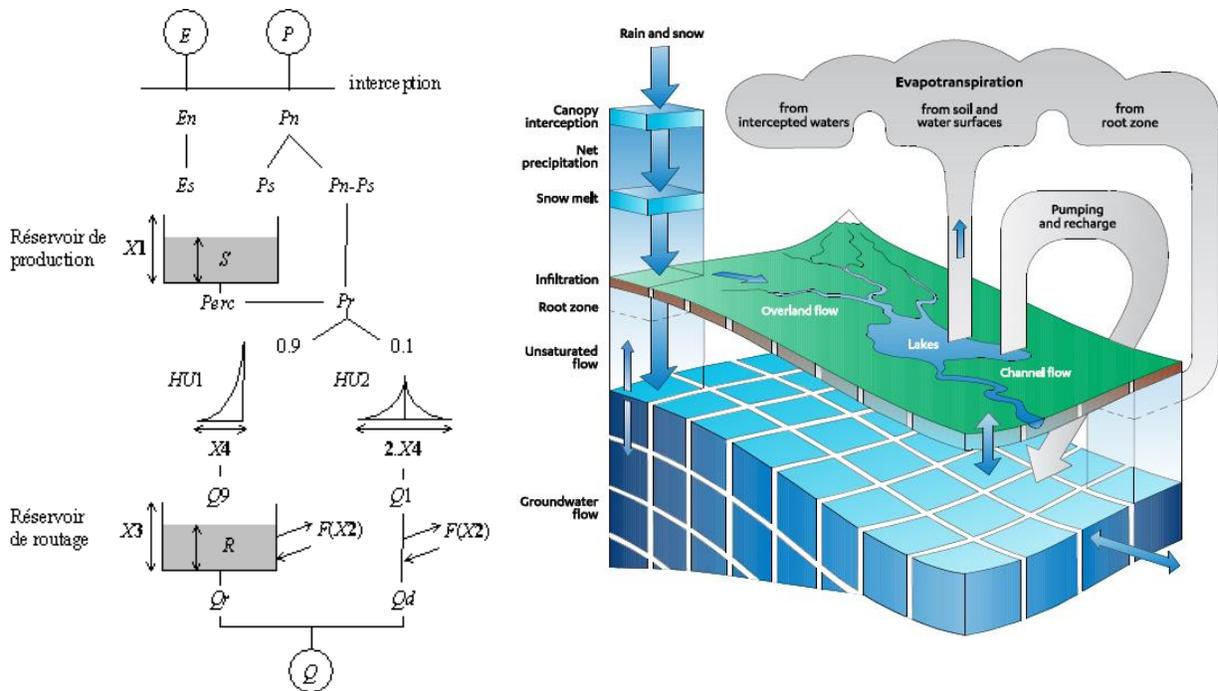


Figura 1-1 En la izquierda, modelo GR4J (<https://webgr.irstea.fr/wp-content/uploads/2013/04/image0021.gif>), en la derecha modelo Mike-SHE (<https://www.mikepoweredbydhi.com/products/mike-she>)

Los modelos físicamente basados utilizan por ejemplo las ecuaciones de Richards (para la circulación del agua en la zona subterránea no saturada), de Darcy (para la circulación del agua en la zona subterránea saturada), de Barré de Saint Venant (para los escurrimientos en superficie libre) y de Penman-Monteith (para la evapotranspiración). En estas ecuaciones intervienen numerosos datos del medio físico, que son generalmente poco accesibles (propiedades texturales, estructurales, hidrodinámicas del suelo, características de la vegetación, estado de la atmosfera...), y además dichas ecuaciones deben ser aplicadas en unas escalas muy finas, sea por razones físicas o sea por razones numéricas. Estos modelos son entonces difícilmente aplicables en la práctica, sin embargo, son herramientas que pueden ser adaptadas a los estudios de impacto (cambio del clima, modificación de la cuenca) o a las pruebas de hipótesis.

Los modelos empíricos proponen una visión del funcionamiento de la cuenca fundada en la observación, en una escala en donde los procesos elementales están integrados dentro de conceptos simplificados. Esos modelos utilizan un número reducido de parámetros, y por lo tanto son más fáciles de utilizar y calibrar. En cambio, su extrapolación fuera del dominio de observación no está garantizada.

- Según el rango de caudales simulados, o las diferentes fases de escurrimiento : modelo continuo (el modelo simula la totalidad del periodo de escurrimiento), o por evento

(el modelo describe solamente el episodio de avenida, o de sequía, o de cualquiera otra fase de escurrimiento).

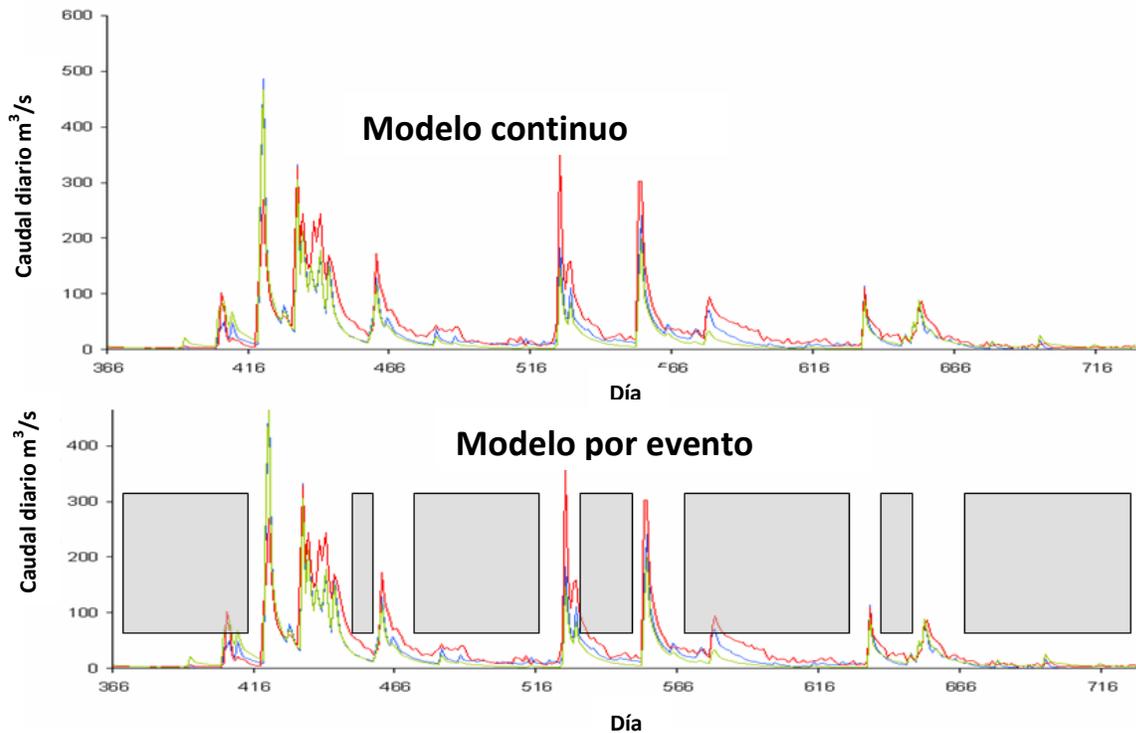


Figura 1.5

Los modelos continuos tienen la ventaja de simular la totalidad de la sucesión de los caudales, lo que incluye en particular las condiciones iniciales al principio de un episodio de avenida. Sin embargo, esos modelos requieren un volumen importante de datos, y potencialmente, un gran número de parámetros (tomando en cuenta la complejidad de la fase inter-evento). Los modelos por evento exigen menos datos, generalmente menos complejos, pero deben inicializarse por variables externas.

- Según la topología elemental: modelo global (las variables se expresan mediante valores promedios sobre la cuenca, lluvia media, pendiente media, etc.) o distribuido (la organización espacial es tomada en cuenta)

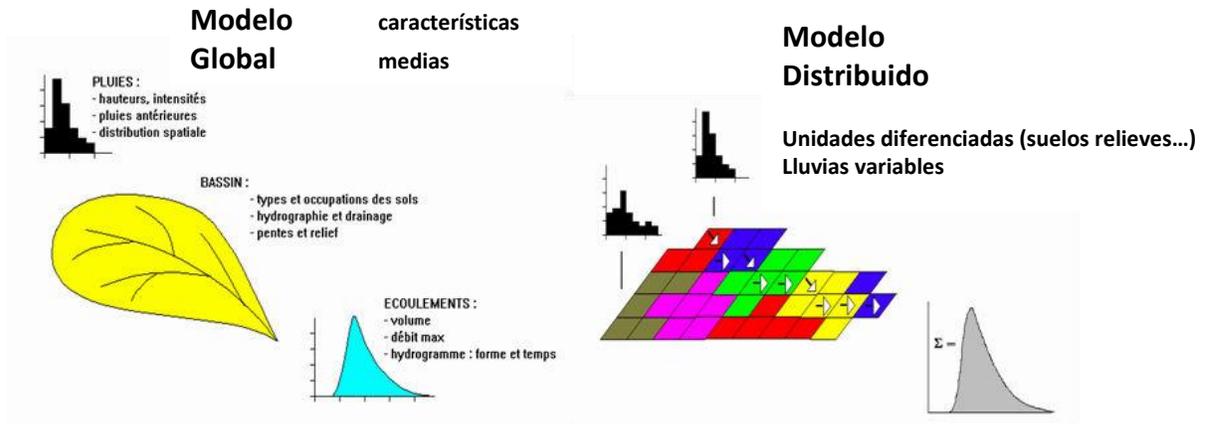


Figura 1.6

No es obligatorio utilizar un modelo distribuido! En condiciones de homogeneidad climática o fisiográfica, un modelo global puede dar resultados equivalentes a los de un modelo espacial. Dicho esto, la estructura distribuida permite explotar la información espacial disponible, a veces sin que el modelo se vuelva excesivamente complejo.

Así, en el caso de una lluvia evidentemente localizada en la cuenca (aguas arriba o aguas abajo), un modelo distribuido simula avenidas desfasadas en el tiempo, con picos de avenida más atenuados conforme la lluvia se localiza aguas arriba de la cuenca. Un modelo global, en ambos casos, simula la misma avenida (línea discontinua)

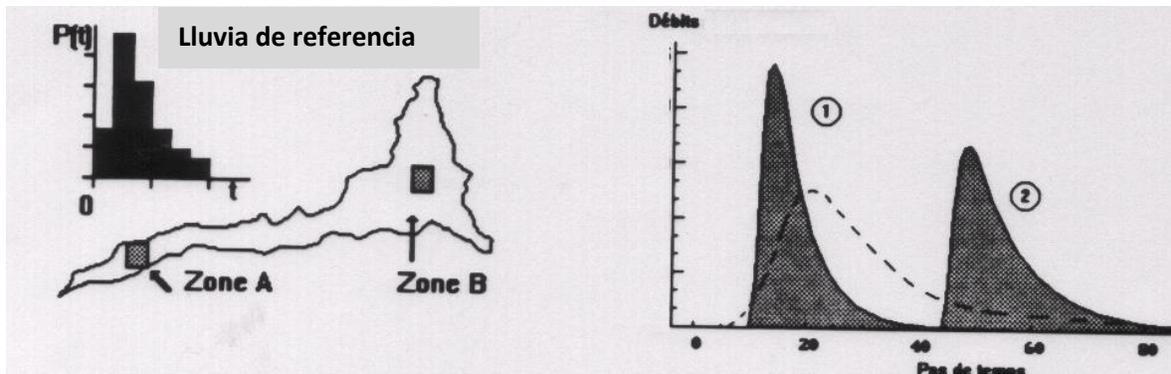


Figura 1.7

1.3 Fundamentos de los modelos aplicados en ATHYS

ATHYS propone un conjunto de modelos en su mayoría distribuidos y por evento. Sin embargo, es posible utilizar también esos modelos en forma global (1 sola malla), y/o de manera continua.

P1. Los modelos considerados en el programa ATHYS operan sobre una estructura de mallas cuadradas regulares. Esta estructura está adaptada para la mayoría de las fuentes de datos espaciales (lluvia de radar, MDE para el relieve, imágenes SPOT para los usos de suelos).

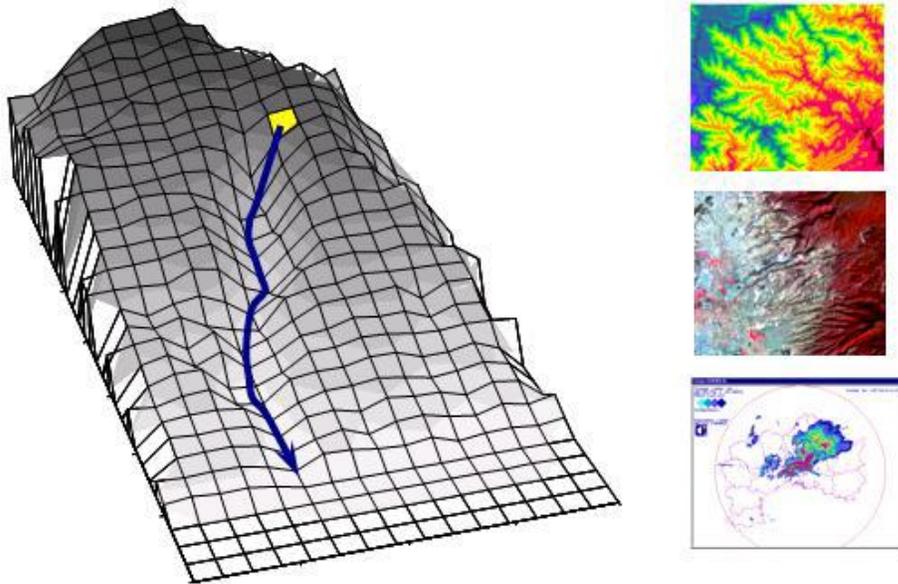


Figura 1.8

P2. La lluvia es interpolada sobre cada una de las mallas: método de polígonos de Thiessen o el método de inverso de la distancia.

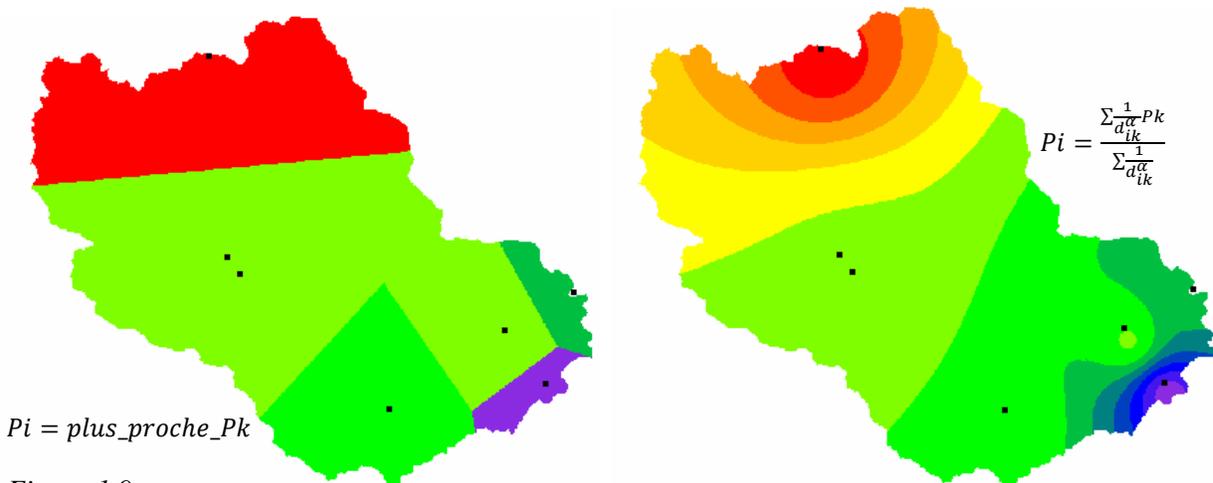


Figura 1.9

P3. Se aplica una función de producción a cada una de las mallas. Cada malla se asocia con una y solamente una función de producción. Las funciones de producción pueden ser diferentes de una malla a otra.

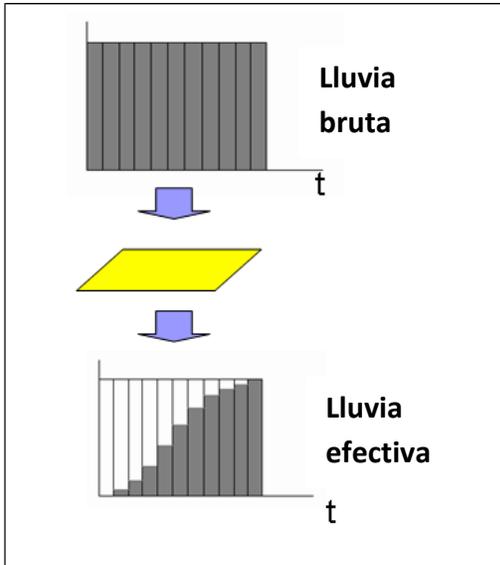


Figura 1.10

Si se denota $P_b(t)$ la lluvia total o bruta al instante t , y $P_e(t)$ la lluvia efectiva calculada por la función de producción, varias relaciones han sido propuestas, como:

Infiltración constante $P_e(t) = P_b(t) - INF$

Coefficiente constante $P_e(t) = COEF. P_b(t)$

Pérdida inicial constante $P_e(t) = 0$ si $\sum_t P_b(t) < STO$
 $P_e(t) = P_b(t)$ si no

SCS $P_e(t) = P_b(t) \left(\frac{\sum_t P_b(t) - Ia}{\sum_t P_b(t) - Ia + S} \right) \left(2 - \frac{\sum_t P_b(t) - Ia}{\sum_t P_b(t) - Ia + S} \right)$

con S , capacidad de almacenamiento e Ia pérdidas iniciales

Green & Ampt $P_e(t) = P_b(t) - K_s \left(\frac{\psi \Delta \theta}{F(t)} + 1 \right)$

con K_s conductividad hidráulica de saturación, $\Delta \theta$ diferencia entre humedad saturada y humedad inicial, ψ potencial matricial al nivel del frente húmedo, $F(t)$ infiltración acumulada desde el inicio del episodio

TopModel $P_e(t) = P_b(t)$ si $\delta_i(t) > 0$
 $P_e(t) = 0$ si no

con $\delta_i(t) = \bar{\delta}(t) - \frac{\tau_i - \bar{\tau}}{f}$ y $\tau_i = Ln\left(\frac{a_i}{tg\beta}\right)$ y $K(\delta_i(t)) = K_0 \cdot \exp(-f\delta_i(t))$

a_i , superficie drenada por la malla i , β pendiente de la malla i , K conductividad hidráulica a saturación y f parámetro de ajuste.

P.4. Se transfieren las lluvias efectivas a la salida. En este caso, se distingue dos modos de transferencia: modo mallas independientes y modo mallas interactivas.

El modo mallas independientes consiste en transferir las contribuciones de cada malla a la salida de manera independiente unas de otras. El modo mallas interactivas toma en cuenta las aportaciones aguas arriba de cada malla, y realiza un balance de los volúmenes que transitan realmente sobre cada malla en cada intervalo de tiempo.

Función Lag and Route (modo malla independiente)

Los tiempos de transferencia se calculan en función de:

- La velocidad de transferencia en cada malla, V_m
- La difusión de la onda de avenida, realizada con ayuda de un depósito lineal, de capacidad Km ; la difusión es más importante conforme la malla está más alejada de la salida.

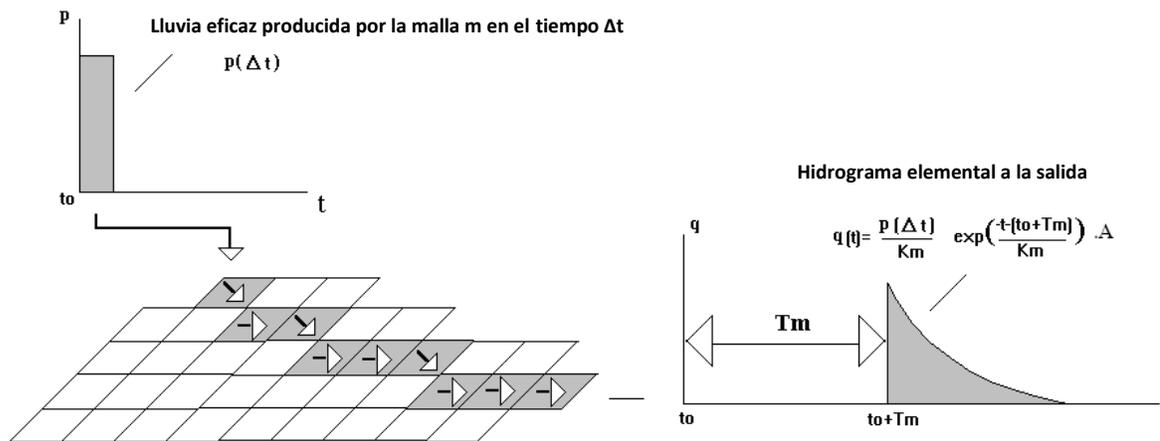


Figura 1.11

Función Onda Cinemática (modo mallas interactivas)

Ver capítulo 6.

1.4 Presentación detallada del modelo SCS-LR

1.4.1. Función de producción tipo SCS

La función de producción SCS es un modelo de producción muy flexible, capaz de adaptarse a diferentes tipos de procesos de formación de avenidas (Steenhuis *et. al*, 1995). La versión utilizada en el modelo se caracteriza por:

- Un coeficiente de escurrimiento instantáneo, función de la acumulación de las lluvias desde el inicio del evento

- Un tanque que simula la humedad del suelo, alimentado por la lluvia infiltrada, y sometido a una descarga
- Un escurrimiento retardado, correspondiente a una fracción de la descarga del tanque suelo

La lluvia efectiva $P_e(t)$ se calcula a partir de la precipitación $P_b(t)$:

$$P_e(t) = P_b(t) \left(\frac{P(t) - 0.2S}{P(t) + 0.8S} \right) \left(2 - \frac{P(t) - 0.2S}{P(t) + 0.8S} \right)$$

La acumulación de lluvias $P(t)$ corresponde a la suma de las precipitaciones desde el inicio del evento, disminuida en una descarga en cada intervalo de tiempo. Esta descarga tiene como objetivo simular el secado de los suelos en el transcurso de los periodos sin lluvia, y la disminución consecuente del coeficiente de escurrimiento potencial.

Se puede considerar que la cantidad de lluvia $P(t)$ corresponde al nivel de un tanque virtual alimentado por la intensidad de precipitación $P_b(t)$, y vaciado por una cantidad proporcional al nivel $P(t)$. El nivel $P(t)$ del tanque se determina por:

$$\frac{dP(t)}{dt} = P_b(t) - ds \cdot P(t)$$

$$P(0) = 0$$

en donde $ds \cdot P(t)$ es el desagüe proporcional al nivel en el tanque.

Para simular un escurrimiento retardado, se considera también un depósito de suelo alimentado por el agua que se infiltra y vaciado por una cantidad proporcional al nivel del depósito. El nivel $stoc(t)$ de este depósito está determinado por:

$$\frac{dstoc(t)}{dt} = P_b(t) - ds \cdot stoc(t)$$

$$stoc(0) = 0$$

en donde $ds \cdot stoc(t)$ representa una descarga debido al secado del suelo por percolación profunda, evaporación, escurrimiento sub-superficial... Por razones de consistencia, los coeficientes de descarga del tanque virtual de lluvias y del depósito de suelo son idénticos, iguales a ds : así, el coeficiente de escurrimiento es potencialmente igual a 0 cuando la humedad del suelo es nula.

Una fracción ω de la descarga del depósito de suelo es llevada a la salida de la cuenca, y entonces, la cantidad producida por la malla en el tiempo t es igual a:

$$P_e(t) + \omega \cdot ds \cdot stoc(t)$$

El modelo de producción tiene por lo tanto 3 parámetros, de los cuales 2 (ds y ω) son constantes de la cuenca y 1 (S) está en función de las condiciones anteriores y el estado del sistema:

S : capacidad total del depósito de suelo, en mm

ds : factor de descarga, correspondiente a un tiempo de secado de los suelos, en dia^{-1}

ω fracción de la descarga que retorna a la salida de la cuenca, sin dimensiones.

NB: para los picos de avenida, el parámetro más sensible del modelo es la capacidad del tanque S , los demás parámetros son poco variables, y pueden ser estimados regionalmente. En la zona mediterránea del sur de Francia, se utiliza por ejemplo: $ds = 1 j^{-1}$, $\omega = 0.2$

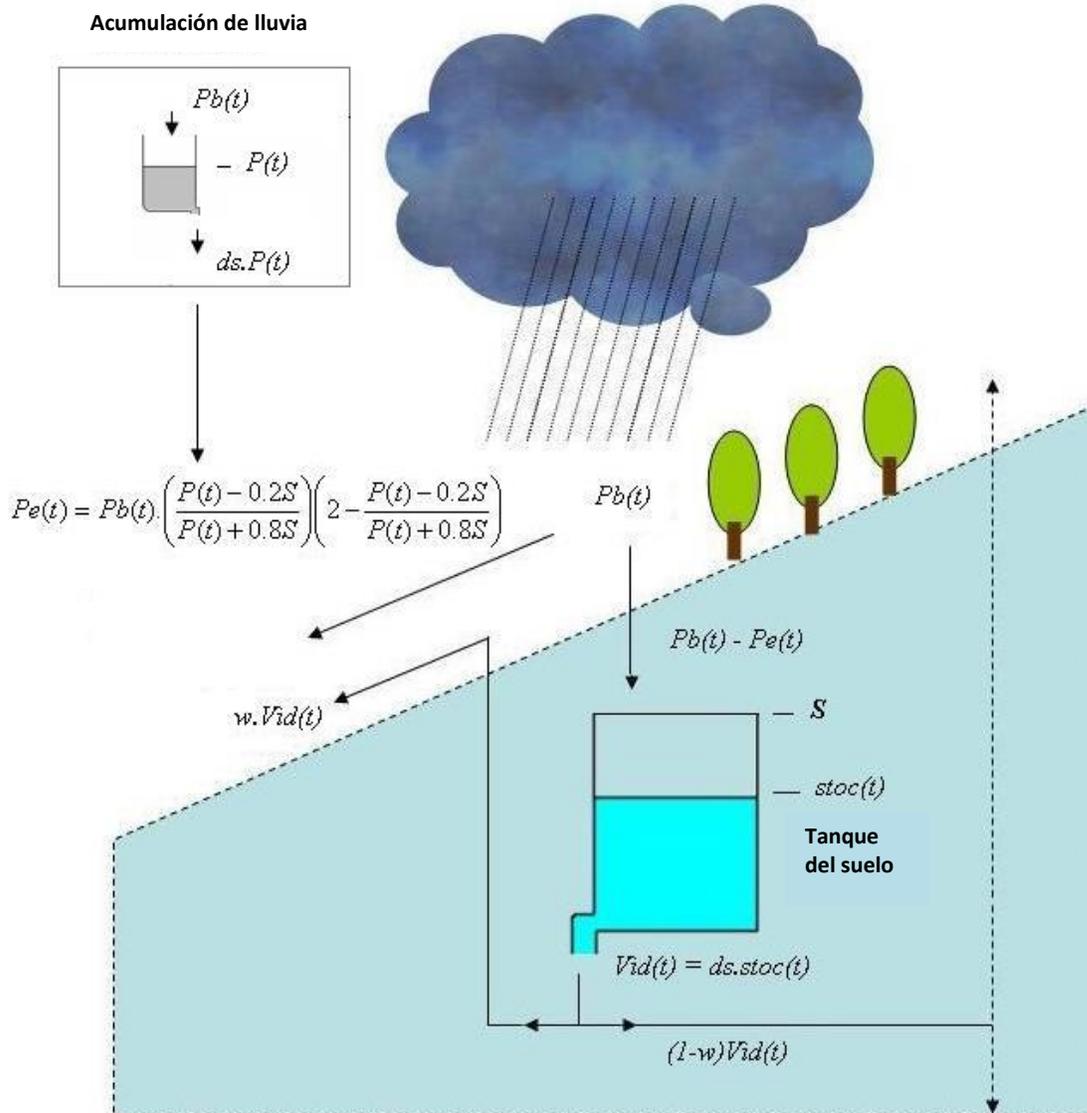


Figura 1.12

NB: el parámetro S puede ser estimado en una primera aproximación según los ábacos de la literatura existente para el modelo SCS.

1.4.2. Función de transferencia Lag and Route

La función de transferencia Lag and Route lleva los volúmenes producidos por cada malla a la salida. Los tiempos de transferencia se calculan en función de:

- La velocidad de transferencia en cada malla, V_m
- La difusión de la onda de avenida, realizada con ayuda del modelo del reservoir lineal, de capacidad Km ; la difusión es más importante conforme la malla está más alejada de la salida.

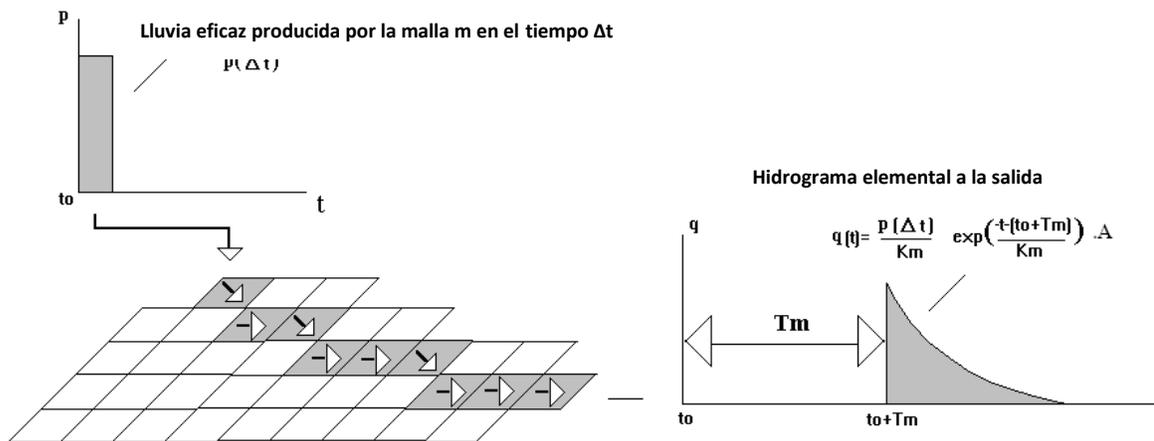


Figura 1.13

Ecuaciones:

$T_m = \sum \frac{l_k}{V_k}$ con l_k y V_k longitud y velocidad de flujo de las mallas situadas entre la malla m y la salida

$$q_m(t) = 0 \quad \text{si } t < t_0 + T_m$$

$$q_m = \frac{p_e(t_0)}{K_m} \exp\left(-\frac{t - (t_0 + T_m)}{K_m}\right) \cdot A \quad \text{si no}$$

A es la superficie de la malla

Para obtener el hidrograma completo, se suman las contribuciones de todas las mallas, para todos los intervalos de tiempo.

Dos parametrizaciones (con 4 parámetros cada una) están propuestas para calcular los tiempos T_m y K_m :

Parametrización llamada "Lag and Route simple": V_0, α, K_0, K_I

$$V_k(t) = V_0 \cdot p_k^\alpha \quad K_m(t) = K_0 \cdot T_m + K_I$$

Con p_k pendiente de la malla k .

Esta parametrización se usa generalmente bajo su forma más sencilla, con $\alpha = 0$ y $K_I = 0$. En este caso, la velocidad de transferencia es constante, igual a V_0 , y el tiempo de difusión K_m es proporcional al tiempo de propagación T_m . El parámetro K_I se utiliza principalmente en el caso de un modelo con una sola malla, simulando un modelo global; en este caso, se utiliza $V_0 = 10000$, $K_m = K_I$.

Parametrización llamada “Lag and Route geomorfológica”: V_0, α, β, K_0

$$V_k(t) = V_0 \cdot p_k^\alpha \cdot S_k^\beta \qquad K_m(t) = K_0 \cdot T_m$$

Con p_k pendiente de la malla k , S_k superficie drenada aguas arriba de la malla k . Esta parametrización hace variar de manera explícita la velocidad de transferencia en función de la pendiente de la malla y de la superficie aguas arriba. Los valores recomendados para α y β son $\alpha = 0.5$ y $\beta = 0.2$.

NB: Cuando V_0 tiene el significado de una velocidad (Lag and Route simple), este parámetro puede ser estimado, en primera aproximación, a partir de las fórmulas de tiempos de concentración existentes en la literatura.

2. Programa ATHYS

El Taller Hidrológico Espacial, ATHYS⁴, tiene por objetivo reunir en un entorno agradable y homogéneo un conjunto de modelos hidrológicos asociados al manejo de datos hidro-climatológicos y geográficos. Fue desarrollado en el IRD⁵ para diversas aplicaciones: gestión de recursos del agua, previsión o predeterminación de eventos extremos, estudios de impactos relacionados con modificaciones antrópicas o climáticas.

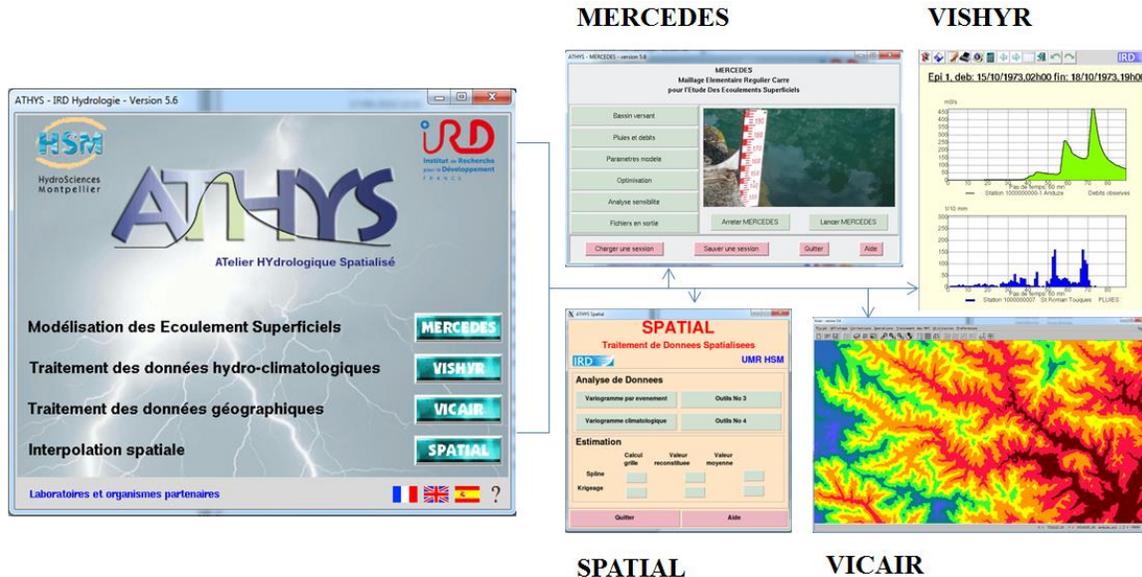


Figura 2.1

ATHYS está conformado por 4 módulos:

- MERCEDES: plataforma de modelación distribuida
- VISHYR: tratamiento de datos hidro-climatológicos locales
- VICAIR: tratamiento de datos geográficos espaciales
- SPATIAL: plataforma de interpolación espacial

El objetivo de este capítulo es presentar brevemente los módulos VICAIR y VISHYR, y más largo la plataforma de modelación MERCEDES.

⁴ Por sus siglas en francés: ATelier HYdrologique Spatialisé (N. del T.)

⁵ Institut de Recherche pour le Développement (Instituto de Investigación para el Desarrollo) (N. del T.)

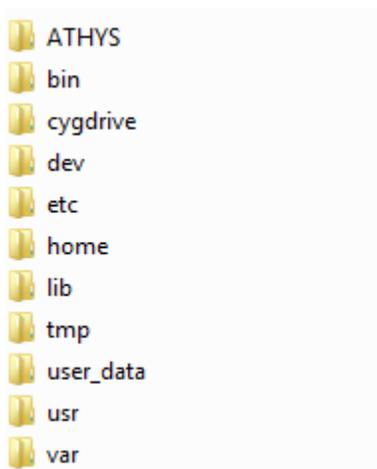
2.1. Instalación de ATHYS

ATHYS puede ser descargado en el sitio www.ATHYS-soft.org, en una versión para Windows o en una versión para Linux. Para la versión Windows, el emulador Linux CYGWIN se utiliza y también se instala durante la descarga.

En la instalación Windows, las etapas son las siguientes:

- Descarga y ejecución del setup.exe
- Definición de un directorio de instalación (ej: C:\ATHYS)
- Copia de los archivos en el disco
- Instalación del emulador Cygwin
- Instalación del programa ATHYS
- Creación de acceso directo y de los íconos
- Instalación del compilador Acotools en el rubro ATHYS (Todos los programas)

Al terminar la instalación, el directorio de instalación contiene en particular las carpetas:



ATHYS contiene la totalidad de los programas del software.

home se refiere a la cuenta del usuario, en donde se almacenaron inicialmente los datos del Gardon d'Anduze

Las demás carpetas son relativas al emulador Linux Cygwin, y no deben ser utilizadas por el usuario.

Al término de la instalación, un ícono es creado en el escritorio.



Figura 2.2

Permite la iniciación de la aplicación, con el menú de presentación:



Figura 2.3

Se abre también una ventana, en la cual aparecerán todas las acciones del proceso: de cálculo, resultados de diferentes instrucciones...

Para salir de la aplicación, se activa  del menu de presentación o de la consola ATHYS.

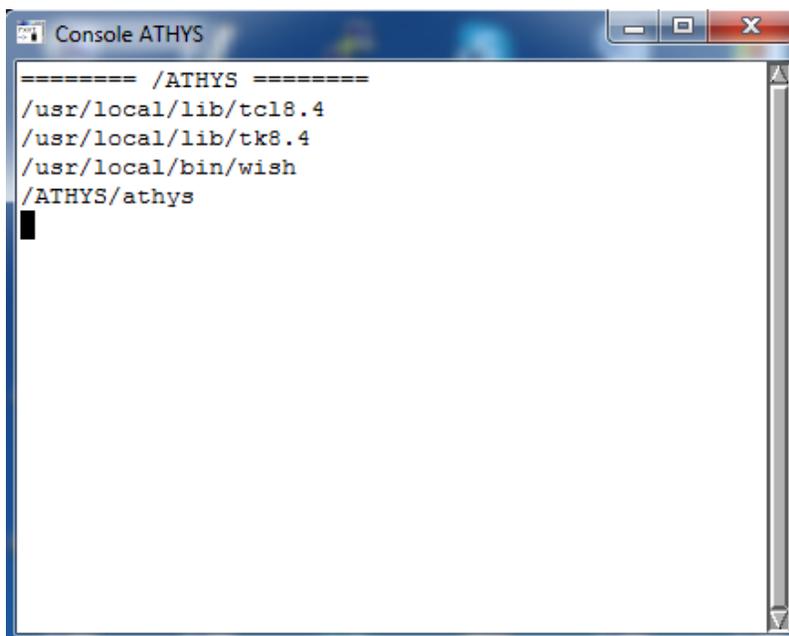
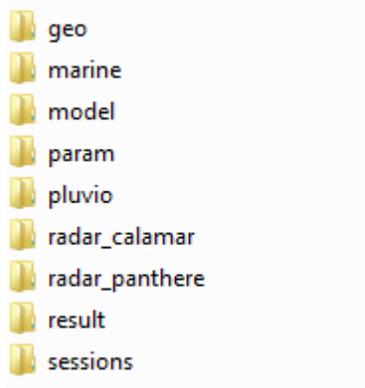


Figura2.4

Los datos del Gardon d'Anduze se ubican en la carpeta /home/athys, la cual contiene en particular:



geo contiene los archivos de datos geograficos espaciales: MDE y sus derivados, suelos...

pluvio contiene los archivos de los datos hidro-pluviométricos: lluvias, caudales...

sessions contiene las diferentes configuraciones de las sesiones guardadas: modelo, parámetros, datos de entrada y salida.

2.2. Presentación de los datos

La cuenca del Gardon d'Anduze se ubica en las Cevenas meridionales, a unos 70 km al noreste de Montpellier, y abarca una superficie de 545 km².

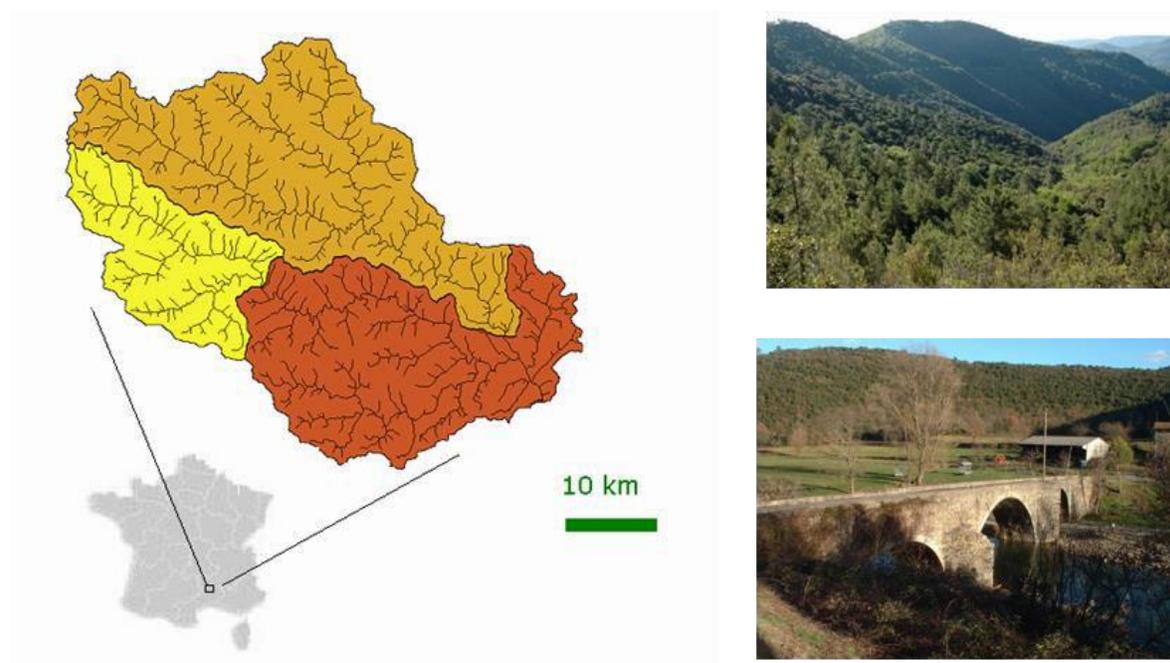


Figura 2.5

La cuenca del Gardon en Anduze esta sujeta a avenidas repentinas, debido a acumulaciones de precipitaciones que pueden alcanzar varias centenas de milímetros en 24 horas, sobre todo en otoño. La avenida del 8-9 de septiembre 2002, cuyo caudal máximo se estimó en mas de 3000 m³/s tiene un periodo de retorno estimado en 50 años.



Figure 2.6



Figure 2.7

La cuenca está formada por 3 unidades geológicas dominantes: esquistos (amarillo), granito (azul), calizas (gris)

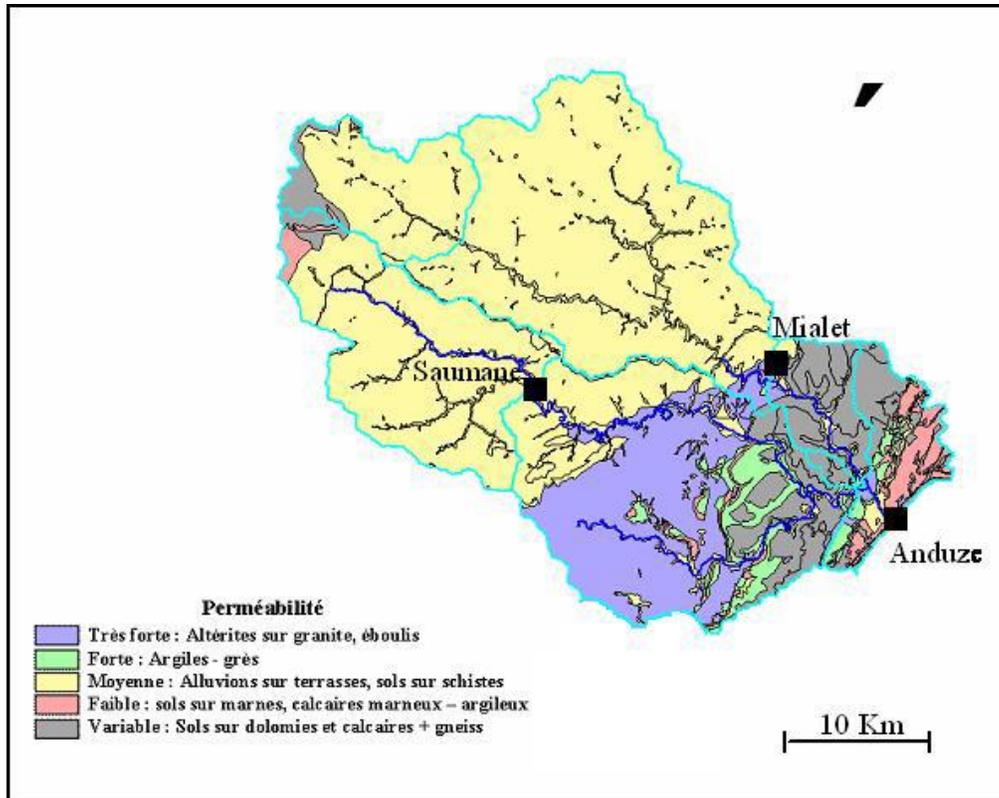


Figura 2.8 (fuente Pierre-Alain Ayrat)

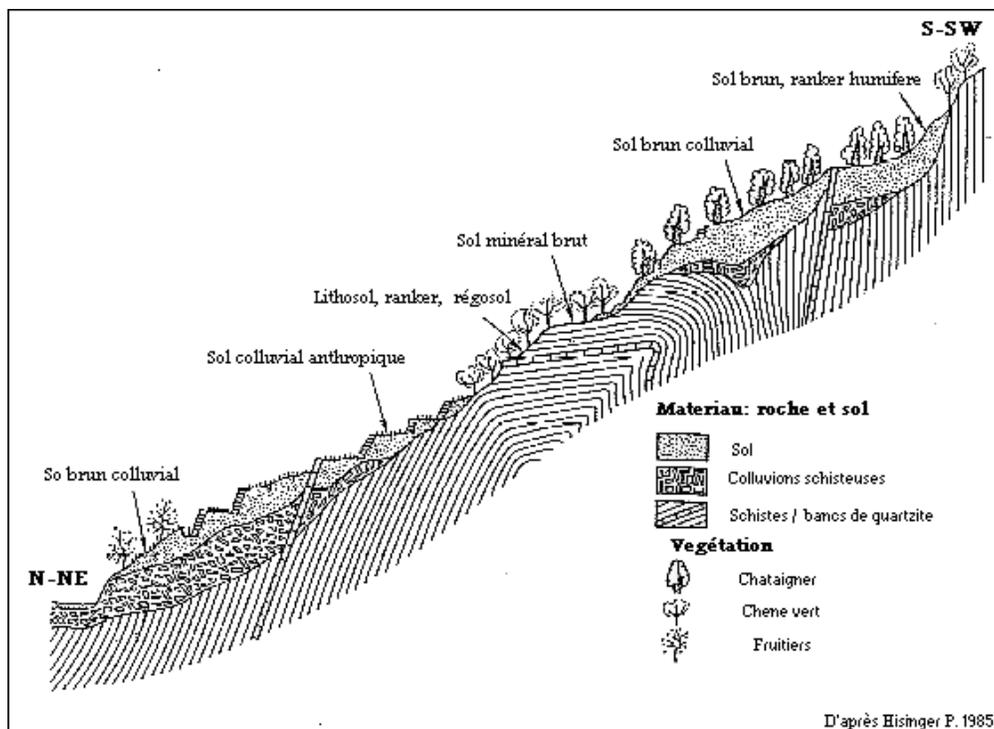


Figura 2.9

Los suelos son poco profundos, esporádicamente más allá de 1 metro. La profundidad promedio es del orden de 30 a 50 cm. Las permeabilidades son por lo general bastante elevadas, y los suelos son capaces de almacenar varias decenas, hasta centenas de milímetros de precipitación antes del inicio de la avenida.

Datos geográficos

Los datos geográficos básicos son:

- El MDE en una división de 50 m
- El archivo de las direcciones de drenaje, extraídas de este MDE

Esos archivos se encuentran en la carpeta geo.

Anduze.alt: Modelo Digital de Elevaciones en una división de 50 m = alturas en los nodos de una cuadrícula de 700x600

Anduze.dr1: Modelo de drenaje en una división de 50 m = direcciones de drenaje, codificadas de 0 al 8, en los nodos de una cuadrícula de 700x600

Referencias de los datos geográficos:

Origen (abajo a la izquierda) X0 = 699,837; Y0 = 1,890,630

Resolución 50 m

Unidad del MDE = 1 (metro)

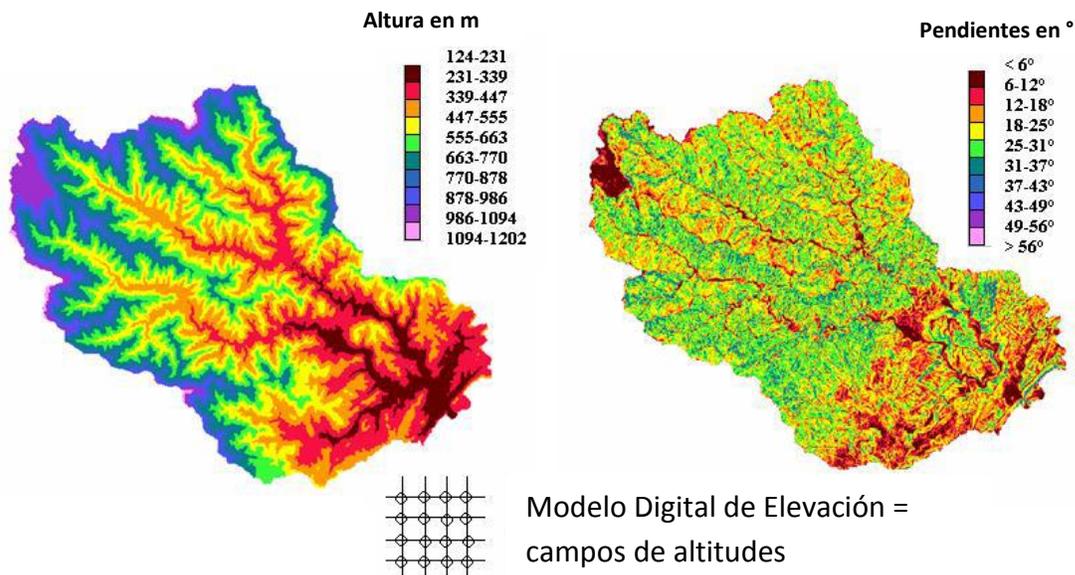


Figura 2.10

Las alturas varían de 124 a 1202 m, y las pendientes son elevadas, 40% en promedio. El Modelo Digital de Elevaciones (MDE) a 50 m permite obtener información numerosa acerca de la topografía y la morfología de la cuenca.

Ejemplo: direcciones de drenaje de cada malla. La dirección de drenaje de cada malla se orienta hacia la malla limítrofe de más baja altitud.

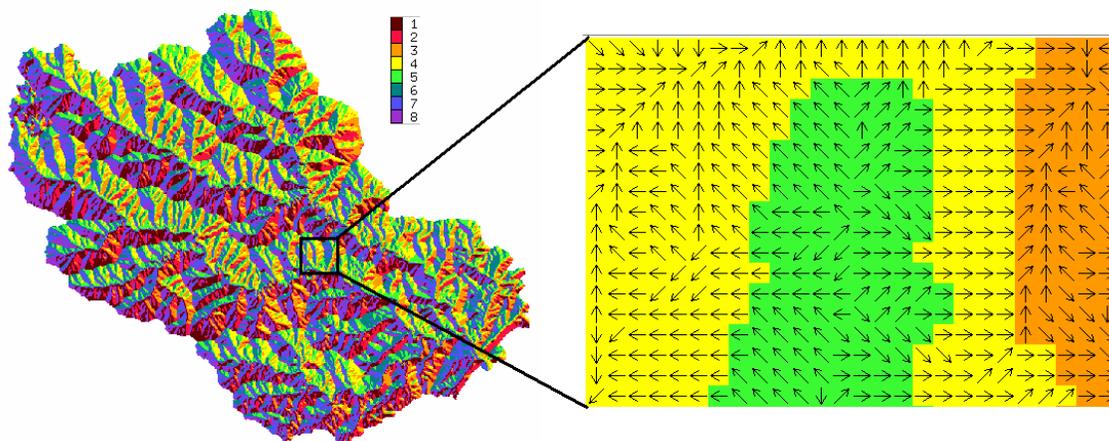


Figura 2.11

Se proporcionan también otros archivos:

[anduze.sol](#): mapa de los suelos, pixel 50 m. Cada pixel es codificado del 1 al 9, según el tipo de suelo asociado.

Datos hidro-pluviométricos

Los datos hidro-pluviométricos básicos se encuentran en el archivo:

base28.txt : datos lluvia-caudal al paso de tiempo horario, 28 episodios de crecida de 1973 a 2003, 1 estación de caudales (Anduze), 6 estaciones pluviométricos + lluvia media (calculada por polígonos de Thiessen)

- Línea 1 Código del formato txt (5000)
- Línea 2 Tipo del dato (caudal observado Q-obs ; caudal ingresando Q-inj ; lluvia P ; temperatura T0 ; evapotranspiración Ev ; concentración C%)
- Línea 3 Número de la estación (en 10 letras para P, T0, Ev, C%, y 12 letras para Q-obs y Q-inj)
- Línea 4 Nombres de las estaciones
- Línea 5 Coordenada longitud en la proyección geográfica (Lambert, UTM ...)
- Línea 6 Coordenada latitud en la proyección geográfica (Lambert, UTM ...)
- Línea 7 Línea vacía para separar los eventos
- Línea 8 et siguientes fecha (dd/mm/aaaa), hora (hh:mm), y correspondientes datos en cada estación. La fecha/hora es la del fin del intervalo de tiempo. El caudal es el caudal medio durante el intervalo de tiempo. La lluvia es el cúmulo durante el intervalo de tiempo.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1		5000							
2		Q-obs	P	P	P	P	P	P	P
3		1000000000-1	1000000005	1000000006	1000000007	1000000008	1000000009	1000000004	1000000000
4		Anduze	Barre-des-Cévennes	Mialet	Saint-Roman-de-Tousq	Saumane	Soudorgues	Anduze	Pmoy
5		732087	705562	726074	714690	714232	719440	738043	700000
6		1896930	1916178	1903962	1906295	1903081	1896440	1907177	1900000
7									
8	15/10/1973 03:00	1.80	-10.00	0.00	0.00	-10.00	0.00	0.00	0.00
9	15/10/1973 04:00	1.80	-10.00	0.00	5.00	-10.00	5.00	0.00	4.00
10	15/10/1973 05:00	1.80	-10.00	5.00	5.00	-10.00	10.00	5.00	6.00
11	15/10/1973 06:00	1.80	-10.00	10.00	5.00	-10.00	10.00	5.00	7.00
12	15/10/1973 07:00	1.80	-10.00	10.00	5.00	-10.00	15.00	15.00	8.00
13	15/10/1973 08:00	1.80	-10.00	15.00	10.00	-10.00	25.00	5.00	14.00
14	15/10/1973 09:00	1.80	-10.00	15.00	5.00	-10.00	5.00	20.00	7.00
15	15/10/1973 10:00	1.80	-10.00	20.00	10.00	-10.00	15.00	10.00	13.00
16	15/10/1973 11:00	1.80	-10.00	10.00	5.00	-10.00	5.00	10.00	6.00
17	15/10/1973 12:00	1.80	-10.00	5.00	5.00	-10.00	5.00	0.00	5.00
18	15/10/1973 13:00	1.80	-10.00	10.00	5.00	-10.00	5.00	10.00	6.00
19	15/10/1973 14:00	1.80	-10.00	5.00	5.00	-10.00	5.00	0.00	5.00
20	15/10/1973 15:00	1.80	-10.00	15.00	5.00	-10.00	5.00	0.00	7.00
21	15/10/1973 16:00	2.01	-10.00	5.00	10.00	-10.00	15.00	10.00	10.00
22									
23	18/10/1973 14:00	100.00	0.00	0.00	0.00	-10.00	0.00	0.00	0.00
24	18/10/1973 15:00	97.00	0.00	0.00	0.00	-10.00	0.00	0.00	0.00
25	18/10/1973 16:00	91.00	0.00	0.00	0.00	-10.00	0.00	0.00	0.00
26	18/10/1973 17:00	85.00	0.00	0.00	0.00	-10.00	0.00	0.00	0.00
27	18/10/1973 18:00	80.00	0.00	0.00	0.00	-10.00	0.00	0.00	0.00
28	18/10/1973 19:00	77.00	0.00	0.00	0.00	-10.00	0.00	0.00	0.00
29									
30	11/09/1976 16:00	15.60	0.00	0.00	0.00	-10.00	0.00	0.00	0.00

NB :

- unidades por default: m³/s para Q, 1/10mm para P, Ev, °C para T₀, % para C%
- los datos faltantes P, Ev, T₀, C% tienen códigos -10, los datos faltantes tienen códigos -100
- la fecha y la hora se separan por un espacio. Los demás datos se separan por tabulación
- la parte decimal se marca con el . (punto)

Se pueden usar también datos de lluvia de radar meteorológico. Se proporcionan datos con lluvias en 5 mm en pixeles de 1 km² (véase sección 8.2).

2.3. Introducción a VISHYR

VISHYR propone diferentes operaciones de correcciones, cálculos, gestión y visualización de datos hidro-climáticos locales.

Vishyr, menú principal

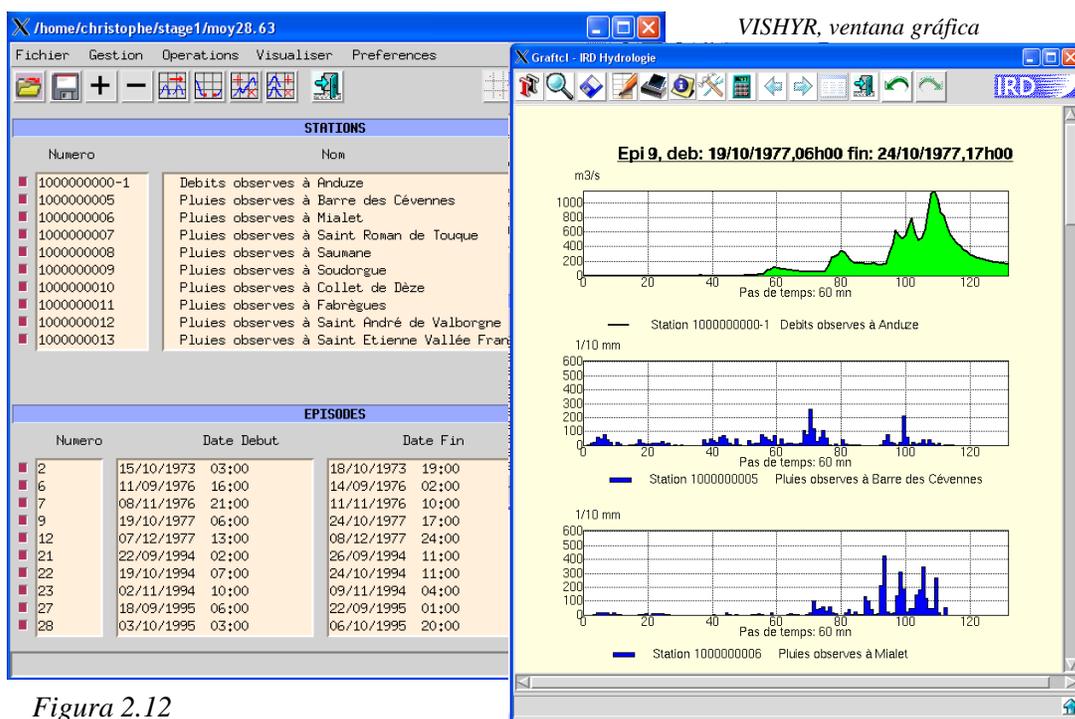


Figura 2.12

Esos datos deben ser primero exportados en un archivo con formato TXT. Existen tres posibilidades para formar esos archivos (ver 4.4)

- Preparar el archivo dentro de Excel, y exportar al formato TXT con tabulación
- Formar el archivo desde datos de radar meteorológico tipo Panther/Antilope o Calamar
- Formar este archivo desde datos exportados de Pluviom e Hydrom

Una vez conformado el archivo TXT, la primera operación consiste en abrir el archivo de los datos pluviométricos 

Después de abrir el archivo, las estaciones y los episodios contenidos en el archivo aparecen en las listas correspondientes. Los diferentes episodios pueden ser visualizados sucesivamente, presionando las teclas:



Visualización del episodio actual



Visualización del episodio siguiente



Visualización del episodio

El ícono  activa o desactiva la visualización de la estación o del episodio correspondiente.

Se puede igualmente suprimir una estación o un episodio contenido en el archivo, o agregar una estación o un episodio contenido en otro archivo.



suprimir una estación o un episodio



agregar una estación o un episodio

Una vez que el archivo ha sido cargado, varios tipos de operaciones son accesibles:

- Visualizar el episodio
- Corregir las lluvias o los caudales (operaciones algebraicas)
- Calcular las características del episodio
- Gestionar las listas de estaciones y episodios

Se remite a las páginas de ayuda del programa para una descripción detallada de las funcionalidades de VISHYR y de su utilización.

Aplicación

- 1.- abrir el archivo de los episodios lluvia caudal base28.txt, que contiene los datos proporcionados para el Gardon d'Anduze
- 2.- visualizar los episodios lluvia-caudal
- 3.- calcular las características de los episodios
- 4.- modificar las listas de las estaciones y de los episodios

2.4. Introducción a VICAIR

VICAIR propone diferentes operaciones de correcciones, cálculos, gestión y visualización de datos geográficos o hidro-climáticos espaciales.

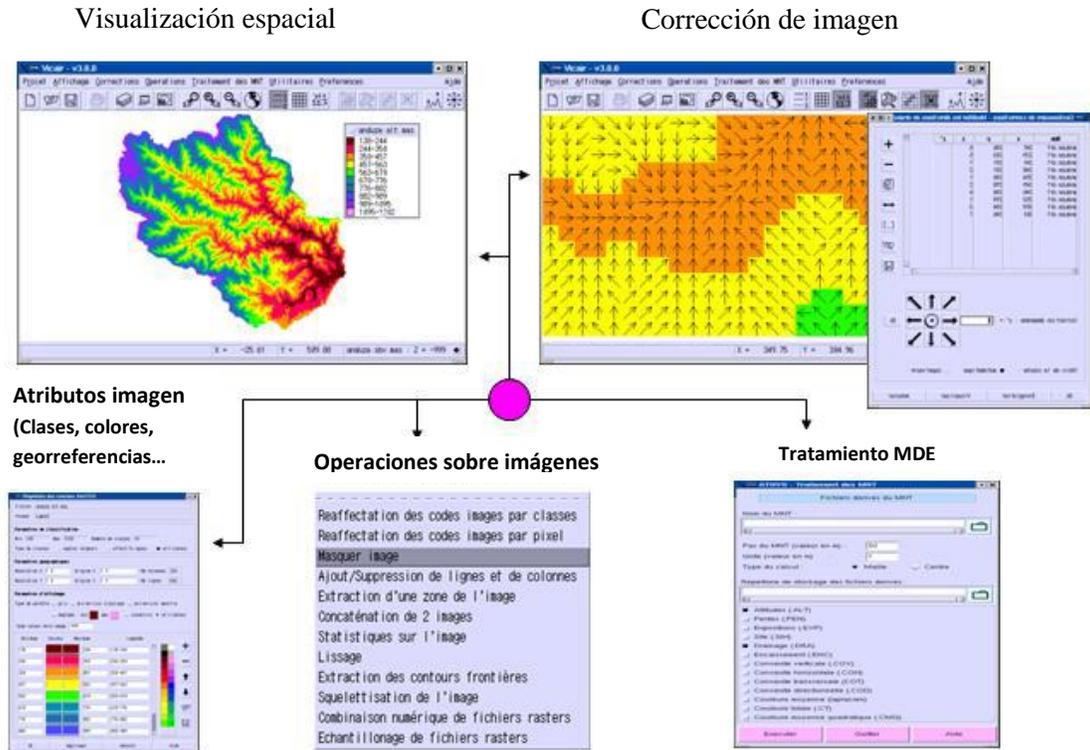


Figura 2.13

VICAIR opera a partir de diferentes formatos estándares:

- Exportación ASCII desde ArcInfo o MapInfo
- Exportación binario o ASCII desde Grass
- Exportación ASCII desde Surfer

La primera operación consiste en:

- Abrir un proyecto:
Proyecto/Nuevo o Proyecto/abrir), en el caso de que existiera ya un proyecto
- Esas funciones abren el gestor de capas, en el cual se gestionan los diferentes archivos que conforman el proyecto (superposición de diferentes imágenes o mapas geográficos)

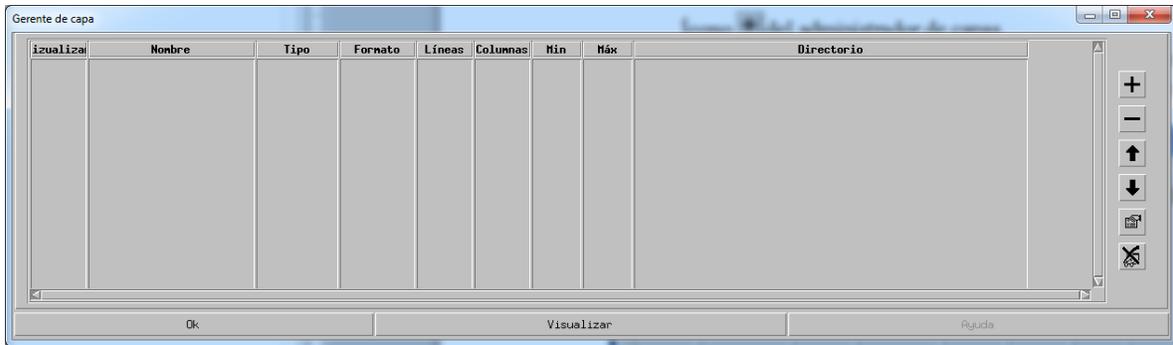


Figura 2.14

- Abrir un archivo:
 Ícono  del administrador de capas
 Este ícono (widget) activa un navegador (browser) que permite escoger el archivo.
 A continuación, el archivo se observa en el gestor de capas

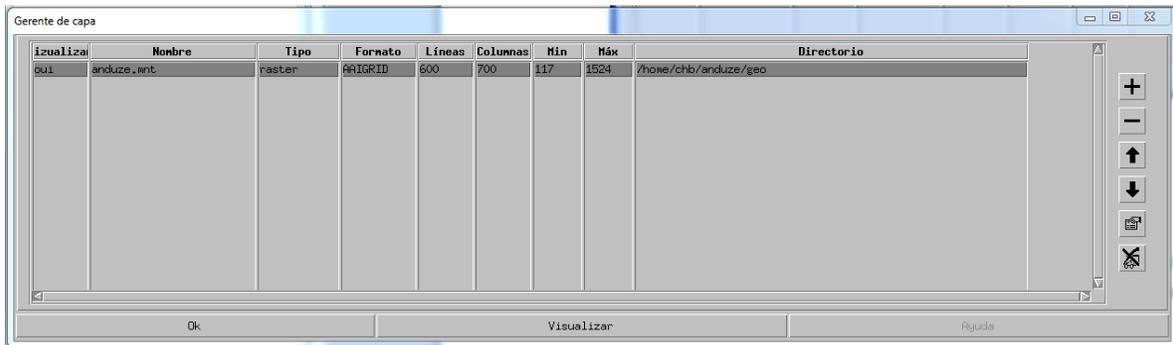


Figura 2.15

- Activar la visualización:
 Botón *Visualizar* del gestor de capas

 Esa tecla activa la vista de la imagen asociada con el archivo, con características numéricas y gráficas determinadas por default (en este caso, 10 clases de colores).

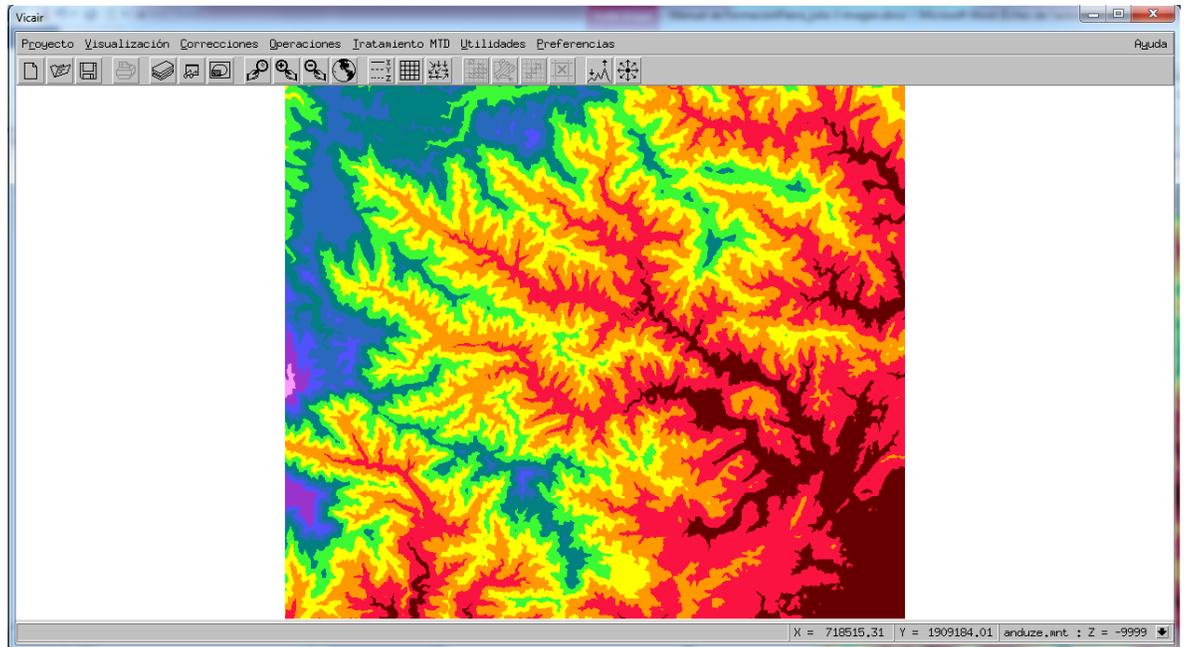


Figura 2.16

- (eventualmente) modificar las propiedades del archivo:

Ícono  del gestor de capas, que abre el gestor de propiedades asociadas con la imagen:

- Nombre de clases
- Geo-referencias en la proyección geográfica, para la ubicación de las imágenes en el espacio
- Selección de la gama de colores, etc.

Aplicaciones

- 1.- visualizar los archivos de datos espaciales proporcionados en la carpeta geo
- 2.- modificar las propiedades de los mapas que aparecen en la pantalla
- 3.- resaltar le red hidrográfica con diferentes niveles de detalles, utilizando el archivo .sbv

2.5. Introducción a MERCEDES

El módulo MERCEDES está compuesto por 6 menús, los cuales permiten implementar una sesión de cálculo.

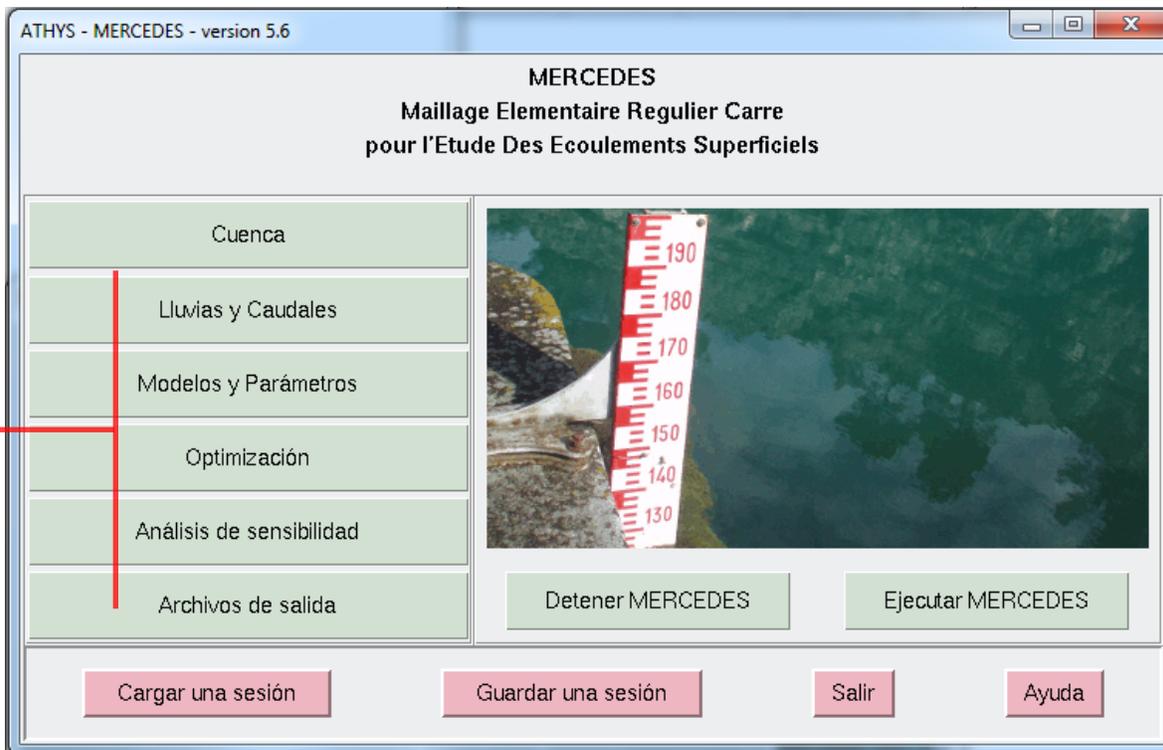


Figura 2.17

- **Cuenca vertedora:** descripción de la cuenca vertedora a tratar
- **Lluvias y Caudales :** características hidro-pluviométricas de los eventos que se van a simular
- **Parámetros de los modelos :** definición de los modelos que se van a utilizar
- **Optimización :** cálculo automático de los parámetros de los modelos desde observaciones lluvia/caudal
- **Análisis de sensibilidad :** variabilidad/sensibilidad de los errores de los modelos
- **Archivos de salida :** declaración de los archivos de resultados

Por otra parte, se puede **cargar** o **guardar** una sesión. Una sesión es el registro de toda la información que permite alimentar los diferentes menús y correspondientes a un modelo dado para una cuenca dada (o un grupo de cuencas)

2.5.1. Menú 1: Cuenca vertedora

Este menú describe las características de la (o las) cuenca(s) vertedora(s) tratada(s) y los archivos asociados.

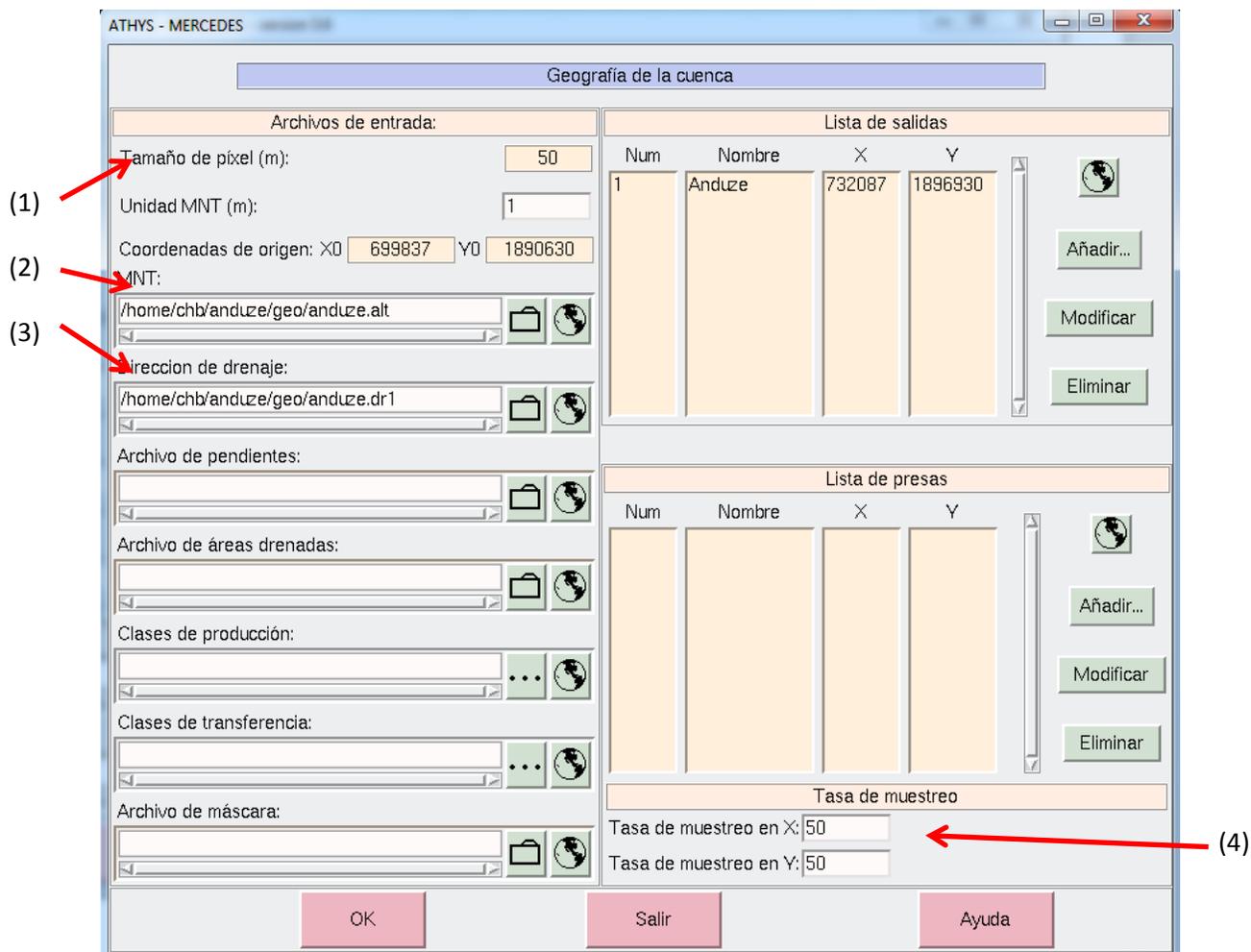


Figura 2.18

El **tamaño del píxel (1)** es la longitud del lado de una malla (en metros), mientras que la unidad del MDE permite administrar unidades diferentes del metro (factor multiplicativo del metro: 10 por decámetro, por ejemplo; 0.1 por decímetro). Las coordenadas origen X0 e Y0 corresponden a las referencias del MDE (coordenadas de la esquina inferior izquierda) en la proyección geográfica utilizada. Los campos tamaño del píxel y coordenadas origen se llenan automáticamente al cargar el archivo MDE.

Dos archivos son imprescindibles para toda simulación.

El archivo **Modelo Digital de Elevaciones (MDE) (2)** es un archivo de tipo Raster. Diferentes formatos pueden ser usados, entre los cuales los formatos pueden ser importados de ArcGis o Grass.

Este archivo es de tamaño M x N (M renglones y N columnas) e indica la altura de los nodos delimitando cada malla.

El **archivo de dirección de drenaje (3)** indica, para cada malla, en cual dirección escurre el agua (y por lo tanto hacia que otra malla), a partir de una codificación de 1 a 8 (Norte =1, Noreste = 2,...). El código = 0 indica una depresión que altera la delimitación de la cuenca, y que habrá que eliminar, por lo menos en el espacio delimitado por las diferentes sub-cuencas vertedoras definidas por las coordenadas de las salidas. La creación del archivo de drenaje y su tratamiento (eliminación de las depresiones) se realiza con el módulo VICAIR. Es un archivo de tamaño M x N.

Los demás archivos son opcionales y se definirán más adelante.

En la parte derecha del menú, se encuentran las coordenadas de las salidas (códigos de los puntos de cálculos), en donde van a realizarse los cálculos de los caudales simulados. Esas coordenadas se expresan en la misma proyección geográfica que aquella utilizada para las coordenadas X0 y Y0 mencionadas anteriormente.



El ícono  permite observar las cuencas vertedoras aguas arriba de esas salidas (para control)

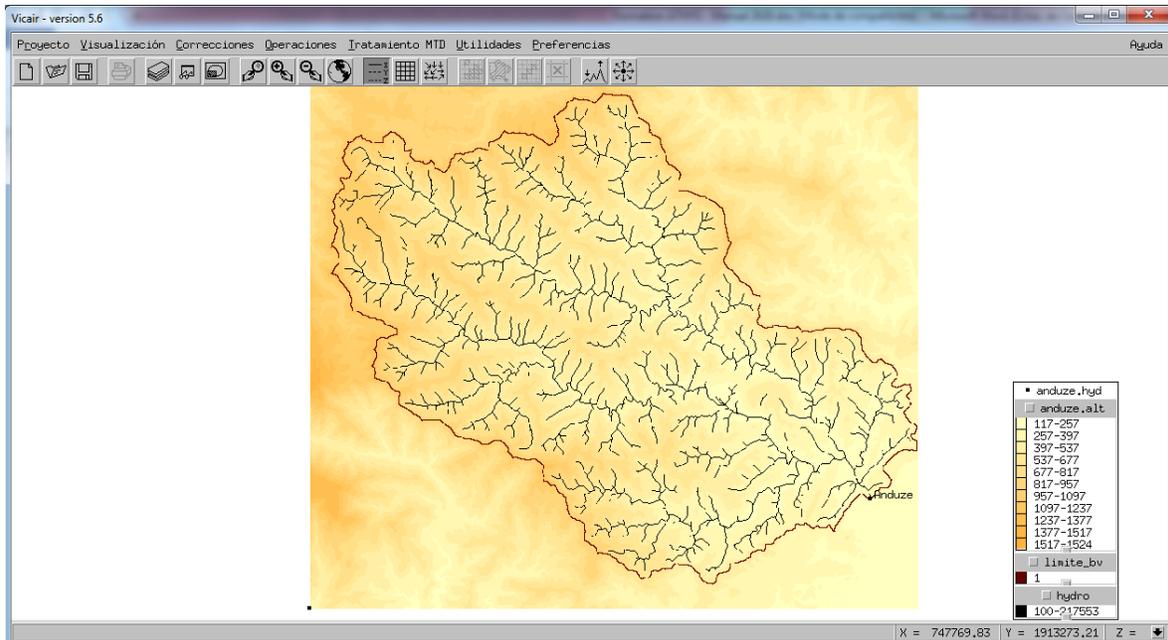


Figura 2.19

Finalmente, la tasa de selección en X y Y (4) permite reducir el tiempo de cálculo limitando el número de mallas consideradas. Para una tasa de selección de 10, por ejemplo, en X y Y, solamente una malla de cada 100 será tomada en cuenta para los cálculos (pero su superficie será multiplicada por 100).

NB: una tasa de selección importante puede modificar de manera sensible los hidrogramas, y se tomará la precaución de comparar los resultados con aquellos obtenidos a partir de las imágenes de base de los hidrogramas medidos.

2.5.2. Menú 2: Lluvias y Caudales

Este menú describe las características hidro-pluviométricas de los eventos que serán simulados.

Se seleccionan las lluvias (medidas) que van a intervenir en el modelo, que generan el escurrimiento en la cuenca vertedora definida anteriormente, y eventualmente, el caudal (medido) a la salida de esta cuenca vertedora, servirá de comparación con la simulación y/o para calibrar los parámetros de los modelos.

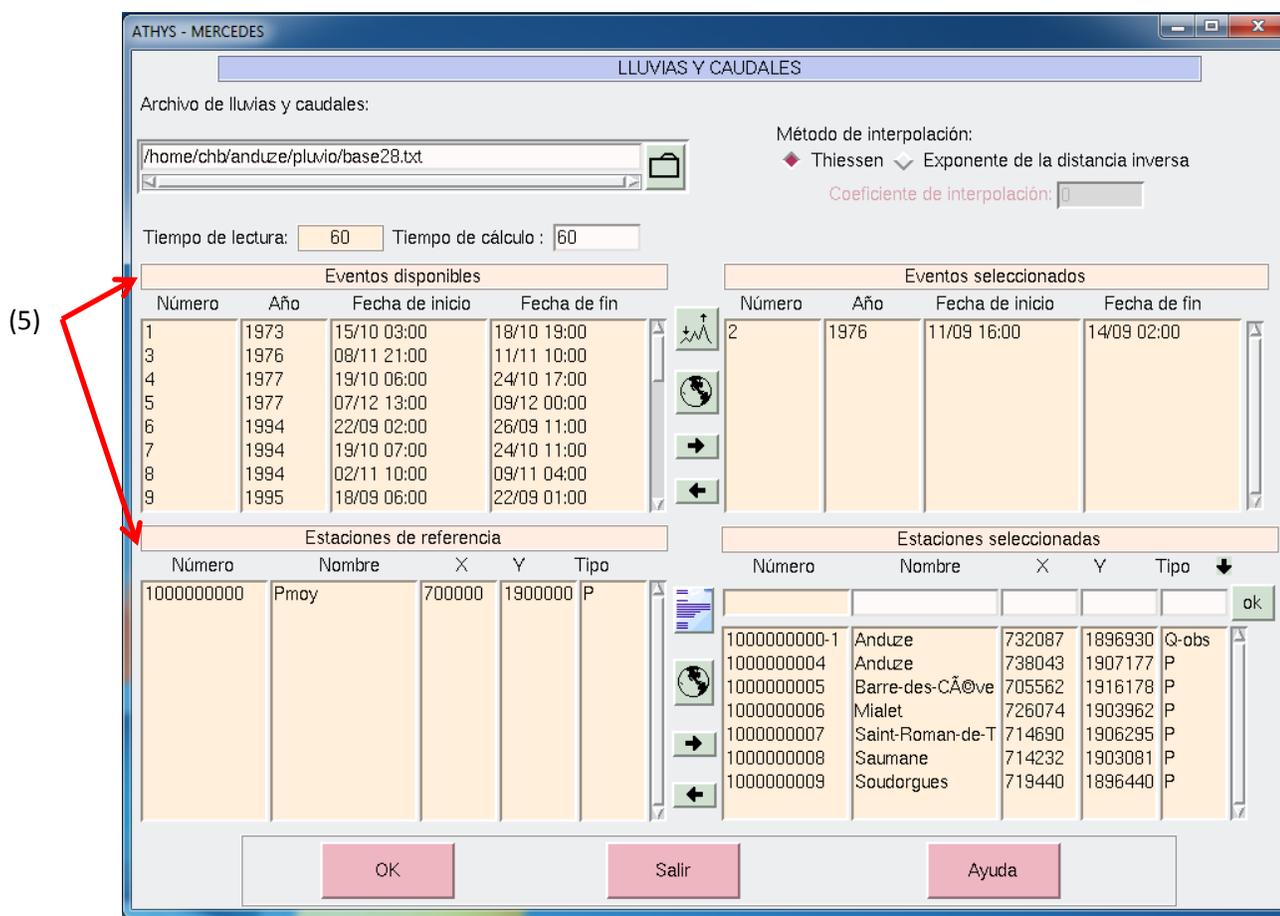


Figura 2.20

El archivo que contiene la información hidro-pluviométrica es un archivo con formato TXT o FTS63, que puede ser formateado por VISHYR. La 1ª operación consiste en nombrar el archivo de datos hidro-pluviométricos. Una vez el archivo es validado, los datos aparecen en la pantalla en las listas (estación y episodio) (5)

En el ejemplo de arriba, el archivo base28.txt reagrupa 28 episodios de avenidas. Se puede escoger simular de 1 a 28 episodios, al pasar los episodios en la ventana derecha (eventos seleccionados):

- Haciendo clic en la ventana de la izquierda o de la derecha.

- Haciendo clic en  o  para seleccionar el evento (pasar de la ventana de la izquierda a la de la derecha)

Un doble clic sobre un evento lo manda de una ventana hacia la otra. Se puede seleccionar varios eventos utilizando la tecla SHIFT del teclado (selección en continuidad) o la tecla Ctrl (selección evento por evento).

Los eventos pueden ser visualizados uno por uno utilizando el botón  una vez seleccionado el evento.

El **intervalo de tiempo de cálculo** que va a servir en la ejecución de los modelos se expresa en minutos, y debe ser un divisor o un múltiplo del tiempo de lectura. Inicialmente, el intervalo de cálculo se establece igual al tiempo de lectura.

Las estaciones pluviométricas e hidrométricas de referencia aparecen en el segundo nivel de la ventana. Se validan las estaciones pluviométricas que servirán a la interpolación espacial de las lluvias transfiriéndolas hacia la ventana de la derecha (e inversamente). En caso de un archivo al formato FTS63, se tiene que capturar las coordenadas X y Y de las estaciones seleccionadas y validarlas con el botón Ok a la derecha. En caso de un archivo al formato TXT, las coordenadas X y Y aparecen automáticamente. La selección de las estaciones hidrométricas permite restituir las observaciones correspondientes en los archivos de resultados del modelo. En caso de optimización de los parámetros, la estación correspondiente a los caudales observados con los cuales serán comparados los caudales simulados debe ser seleccionada obligatoriamente.

El botón  corresponde a la introducción de coordenadas a partir de un archivo de Texto (este aspecto será abordado más adelante y es útil para las lluvias de radar)

El botón  corresponde a una visualización del posicionamiento de los pluviómetros.

Los botones arriba a la derecha de la pantalla **Métodos de interpolación – Polígonos de Thiessen o inverso de la distancia** permiten elegir qué método se va a utilizar para interpolar la lluvia en cada malla.

2.5.3. Menú 3: Parámetros de los modelos

En este menú se definen los modelos que van a ser utilizados para la función de producción y la función de transferencia.

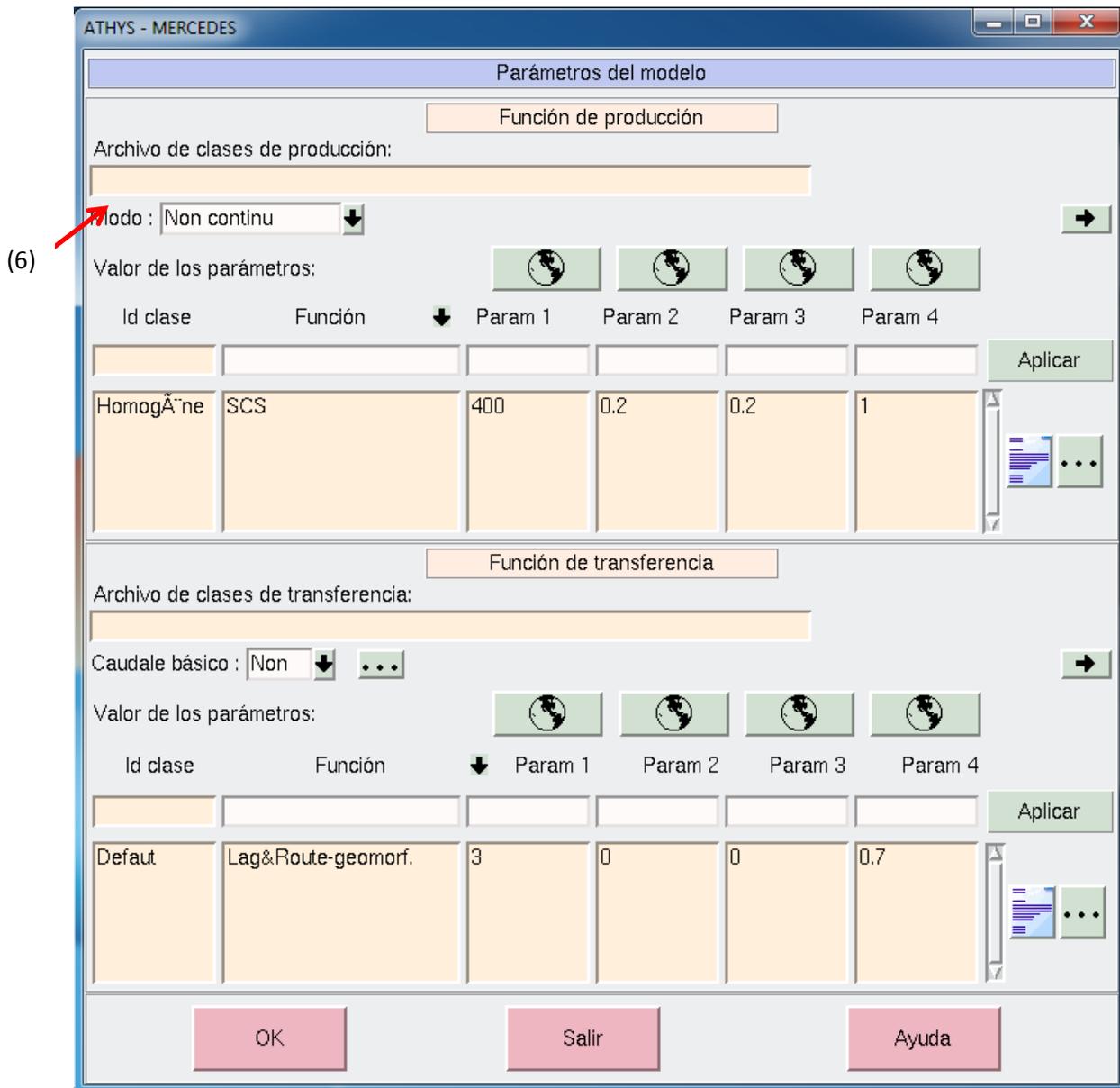


Figura 2.21

La información Archivos de clases de producción y Archivos de clases de transferencia se utilizarán más adelante.

Función de producción

El modo **Continuo** o **No continuo** (6) designa el comportamiento del tanque del suelo, principalmente el estado inicial de este tanque cuando eventos pluviométricos se suceden. El modo continuo implica que el nivel H_0 del tanque del suelo al principio depende del nivel H_1 al fin del episodio presente y de la duración t_0-t_1 que separa los dos episodios: $H_0 = H_1 \exp(-ds.(t_0 - t_1))$,

en donde ds es el coeficiente de vaciado retenido en la función de producción. El modo No continuo hace que el nivel en el tanque esta nulo al principio de cada episodio.

Cada función de producción cabe 8 parámetros, de los cuales 4 solamente aparecen e la pantalla.

Los otros 4 parámetros aparecen al clicar en  , en el lado derecho de la pantalla.

La flecha  a la derecha de *Función* permite escoger entre las funciones programadas.

Escoger un modelo de producción conlleva su selección en el menú. Se puede entonces escoger el valor de los parámetros del modelo y validar esta decisión con el botón *Aplicar* a la derecha del menú. En el marco de un modelo global se valida forzosamente la línea que se presenta en el menú.

Función de transferencia.

La selección del modelo de transferencia y de los parámetros asociados es idéntica al caso anterior.

El modo **Caudal base-** (Si/no) permite tomar en cuenta y modelar el caudal base en la simulación de los episodios de avenida. El molo **Caudal base-** Si permite obtener un caudal de base de la forma:

$$Q(t) = Q_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot (t - t_0))$$

En donde:

- Q_0 y α son constantes para todos los episodios (FIX)
- Q_0 y α se deducen de las observaciones en una estación de referencia (OBS)
- Q_0 y α se deducen del episodio anterior (AJUST)

Esas opciones tienen que definirse en la ventana que aparece cuando se activa el modo **Caudal base-** Si:

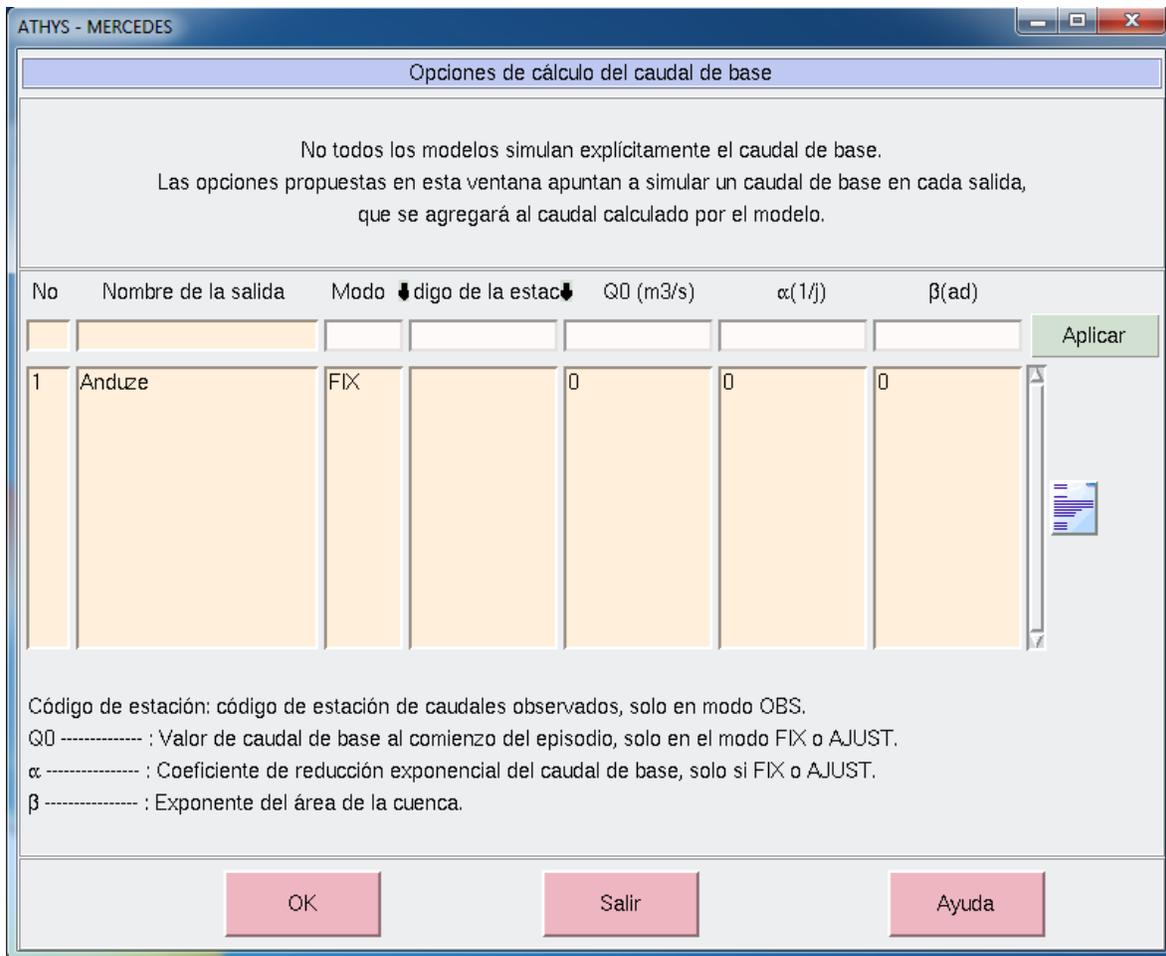


Figura 2.22

Íconos

Los íconos  permiten hacer variar en el espacio los parámetros de la columna correspondiente, en función de un mapa geográfico (véase sección 6)

Los íconos  permiten hacer variar para cada episodio los parámetros de la columna correspondiente, en función de los valores definidos en una tabla (véase sección 3.4)

Los íconos  permiten llenar la tabla de parámetros en función de un archivo organizado como sigue, en el caso de varias clases de producción o de transferencia:

Id	Función	Par1	Par2	Par3	Par4	Par5	Par6	Par7	Par8
.....

2.5.4. Menú 4: Optimización

Este menú permite calcular automáticamente los parámetros "óptimos" de un modelo, por minimización de una función de desviación entre valores observados y valores simulados por el modelo.

Parámetros de producción					
Id clase	Función	Param 1	Param 2	Param 3	Param 4
HomogÁ:ne	SCS	>400<	0.2	0.2	1
Límites inferior:		0.0	0.0	0.0	0.0
Límites superior:		1000.0	300000	500	1000.0

Parámetros de transferencia					
Id clase	Función	Param 1	Param 2	Param 3	Param 4
Defaut	Lag&Route-gec	>3<	0	0	0.7
Límites inferior:		0.01	0.0	0.0	0.0
Límites superior:		1000.0	5.0	5.0	100.0

Estación hidrográfica de referencia: 1000000000-1 Anduze

Salida asociada: 1 Anduze

Modo de optimización:
Método de optimización: Simplex BLUE
Tipo de optimización: Separada simultánea
Eventos: No agrupados Agrupados

Área de calibración:
Cálculo entre: Evento completo
Límites de caudal (en m3/s):
Q inf. = 50 Q sup. = 6000
Límites de tiempo (en intervalos de tiempo):
t inf. = 1 t sup. = 100

Elección de criterio:
Transferencia: EGM
Cantidad de iteraciones: 300

OK Salir Ayuda

Figura 2.23

Parámetros de producción y de transferencia

La parte izquierda de la pantalla permite, con un doble clic izquierdo sobre el valor de un parámetro, seleccionarlo para optimización. El valor del parámetro aparece entonces entre los símbolos ">" y "<". Puede entonces seleccionarse los límites de calibración que se considerarán para cada parámetro.

Observación: al abrir este menú, los nombres de los parámetros no son indicados. Es suficiente hacer clic en el nombre de la función para que esos nombres se indiquen.

Observación; hay que tener cuidado con los límites de variación del parámetro a calibrar: el valor inicial del parámetro – aquello que se le da en el menú 3 y que aparece en este menú – también debe incluirse en los límites que se definen.

Método de optimización

Dos métodos de optimización están disponibles y proponen una exploración del espacio de los parámetros, que converge hacia el juego de parámetros que minimice una función de desviación entre valores observados y valores simulados.

El método Simplex es un método de exploración geométrico, mientras que el método BLUE converge según el gradiente de cada parámetro (pendiente - o derivada – del modelo con respecto al parámetro considerado). La convergencia es más rápida en el caso de BLUE, pero el Simplex es más robusto, y se puede restringir efectivamente los valores del parámetro a optimizar a un intervalo limitado (lo que no siempre es posible con BLUE).

Tipo de optimización

El tipo de optimización **Separada** corresponde a una calibración en dos tiempos: primero los parámetros del modelo de producción se calibran por comparación entre los volúmenes observados y simulados a la salida de la cuenca, luego, una vez estos parámetros se fijan, los parámetros de la función de transferencia se calibran por comparación entre los caudales observados y simulados a la salida de la cuenca.

El tipo de optimización **Simultánea** corresponde a una calibración simultánea de todos los parámetros pedidos, por comparación entre los caudales observados y simulados a la salida de la cuenca.

La opción Eventos **no agrupados** o Eventos **agrupados** ofrece dos posibilidades:

- Sea individual sobre cada evento: cada evento tendrá un juego de parámetros calibrados, y se tendrá entonces el mismo número de calibraciones que de eventos
- Sea sobre todos los eventos simultáneamente: un solo juego de parámetros es determinado para todos los eventos.

Área de calibración

Se definen en esas opciones los límites dentro de los cuales el criterio de calibración va a ser calculado. El cálculo puede realizarse sobre:

Todo el episodio: el criterio se calcula sobre la duración total del evento o del grupo de eventos, según la selección anterior Eventos no agrupados o Eventos agrupados

Pico de avenida: la calibración se realiza buscando reproducir de la mejor manera posible los valores de los picos de las avenidas (en el caso de varios episodios, o del pico de avenida en el caso de un solo episodio), independientemente del momento en que se presentan esos picos de caudales.

Caudales limitados: el cálculo del criterio se efectúa únicamente para valores de caudales medidos entre Q_{inf} y Q_{sup} , definidos en el renglón justo arriba.

Tiempos limitados: el cálculo se efectúa entre las 2 fechas definidas abajo, expresadas en número de intervalos de tiempo.

Caudales y tiempos limitados: se trata de la asociación de las 2 restricciones anteriores.

Selección del criterio

Según la selección del modo de optimización anterior, se escoge un criterio de calibración para las funciones de producción y de transferencia.

Si se seleccionó un tipo de optimización simultánea, solamente se escoge un criterio para la función de transferencia porque la calibración se hará únicamente sobre la comparación caudales medidos/caudales calculados.

Cuatro criterios están disponibles actualmente:

- Desviación Aritmética Media $EAM = \frac{\sum |X_i - Y_i|}{\sum Y_i}$
- Desviación Cuadrática Media $EQM = \frac{\sqrt{\sum (X_i - Y_i)^2}}{\sum Y_i}$
- Criterio de Nash $= 1 - \frac{\sum (X_i - Y_i)^2}{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}$
- Criterio CREC $= \sum \left(1 - \frac{\bar{X}}{Y_i}\right) \times \sum \left(1 - \frac{Y_i}{\bar{Y}}\right) \times \frac{1}{N}$

En donde X_i designa los N valores calculados y Y_i los N valores observados y \bar{Y} es el valor medio de los N valores observados.

X y Y representan los volúmenes de escurrimiento en el caso de un criterio volumétrico, y los caudales en el caso de un criterio hidrométrico (caudal en cada intervalo de tiempo, caudal de pico de avenida, o caudales incluidos entre dos valores y/o dos fechas según la selección del dominio de calibración).

Observación: en el caso del criterio de Nash, solamente se toman en cuenta los pares de valores (observados o calculados) correspondientes a valores observados estrictamente positivos

2.5.5. Menú 5: Análisis de sensibilidad

Este menú permite hacer variar 2 criterios en una gama de valores dados, y de visualizar la variación del criterio de error utilizado. El análisis de sensibilidad es complementario a la optimización, y además de la localización de juegos de parámetros óptimos, indica la variabilidad del criterio alrededor del valor óptimo, la presencia de varias regiones en donde el criterio está cerca del valor óptimo, una eventual dependencia entre parámetros,...

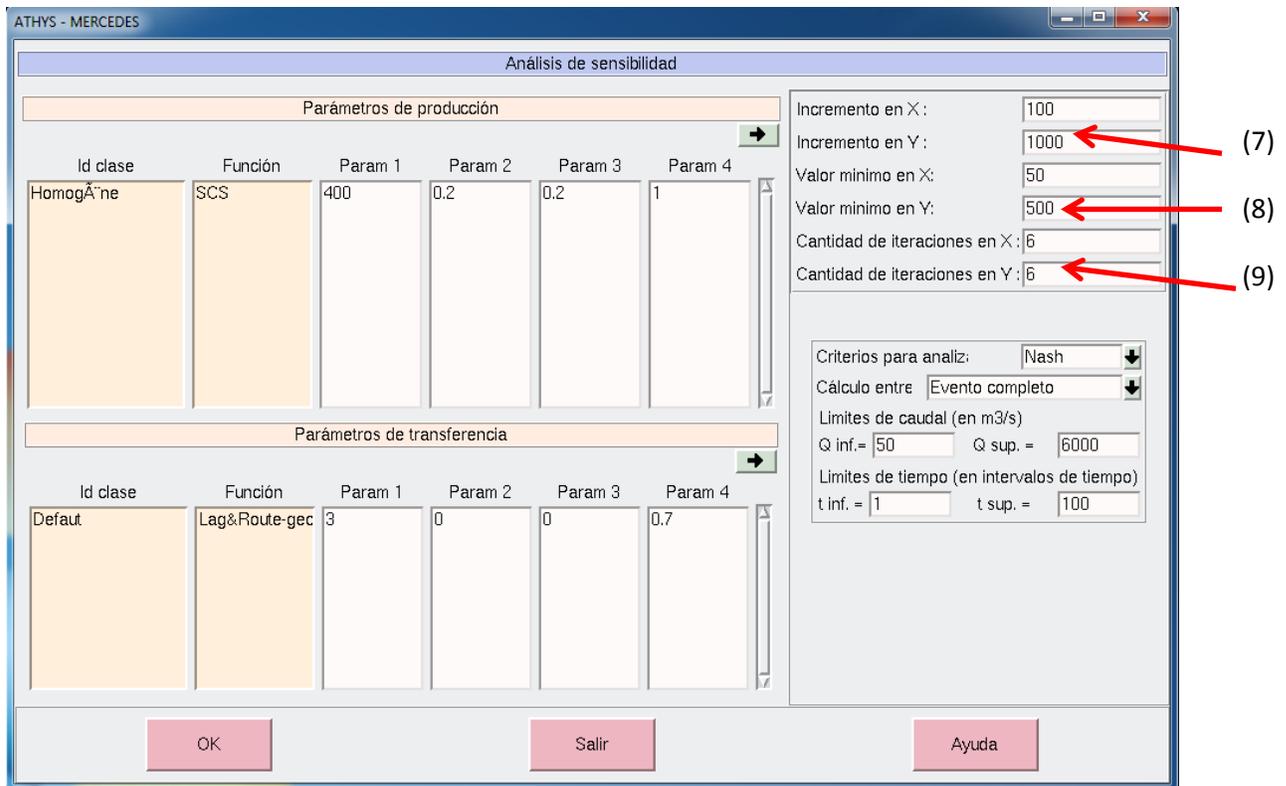


Figura 2.24

Selección de los parámetros a variar: por razones ligadas a la visualización de los resultados, el número de parámetros que se puede hacer variar está limitado a 2. La selección (o deshacer la selección) de un parámetro se realiza mediante un doble clic izquierdo sobre el campo correspondiente al valor del parámetro. En la ventana de la figura 2.25, 2 parámetros fueron seleccionados: parámetro S de la función de producción SCS y el parámetro V_0 de la función de transferencia Lag and Route.

NB:

- Las variaciones de parámetros están permitidas solamente en el intervalo de los límites inferior y superior declarados para cada parámetro en el menú 4 (optimización)
- El criterio calculado para el análisis de sensibilidad es sistemáticamente un criterio de error sobre los caudales
- El análisis de sensibilidad puede ser efectuado para cada episodio considerado individualmente, o para un grupo de episodios (en este caso, el criterio de error se calcula sobre el conjunto de caudales del grupo de episodios). Esa selección se determina en el menú 4 (optimización), con la opción Eventos no agrupados o Eventos agrupados.

Las variaciones de los parámetros seleccionados se determinan por:

- **Incremento de investigación (7):** incremento de la variación del parámetro seleccionado

- **Valor inicial (8):** valor inicial del parámetro seleccionado
- **Número de iteraciones (9):** cada iteración agrega un incremento al valor inicial del parámetro seleccionado

NB:

- El parámetro *X* siempre es el primer parámetro seleccionado, en el orden de los renglones, luego de las columnas; el parámetro *Y* es el segundo parámetro seleccionado
- El análisis de sensibilidad solo funciona con 2 parámetros

Selección del criterio: los criterios de errores que están disponibles son: EQM, EAM, Nash, CREC

Área de calibración : El cálculo de la función criterio puede realizarse sobre diferentes partes de los hidrogramas de avenida, hidrograma completo, caudal máximo de avenida, caudales situados entre dos valores Q1 y Q2 y/o entre dos instantes t1 y t2.

Cuando el proceso de análisis de sensibilidad es activado, los resultados aparecen en el archivo listing:

```
Calculo de las variaciones del criterio en progreso....
Param1      Param2      Criterio
50. 0.      -0.230813111
50. 0.2     -3.18387821
50. 0.4     -3.39101582 etc...
```

Las variaciones del criterio pueden ser representadas también en el archivo de variaciones del criterio, el cual se obtiene en la salida de MERCEDES en el menú 6 (archivos de salida). Este archivo puede visualizarse en VICAIR.

2.5.6. Menú 6: Archivos de salida

Este menú permite declarar los nombres de archivos en donde los resultados de las simulaciones serán guardados.

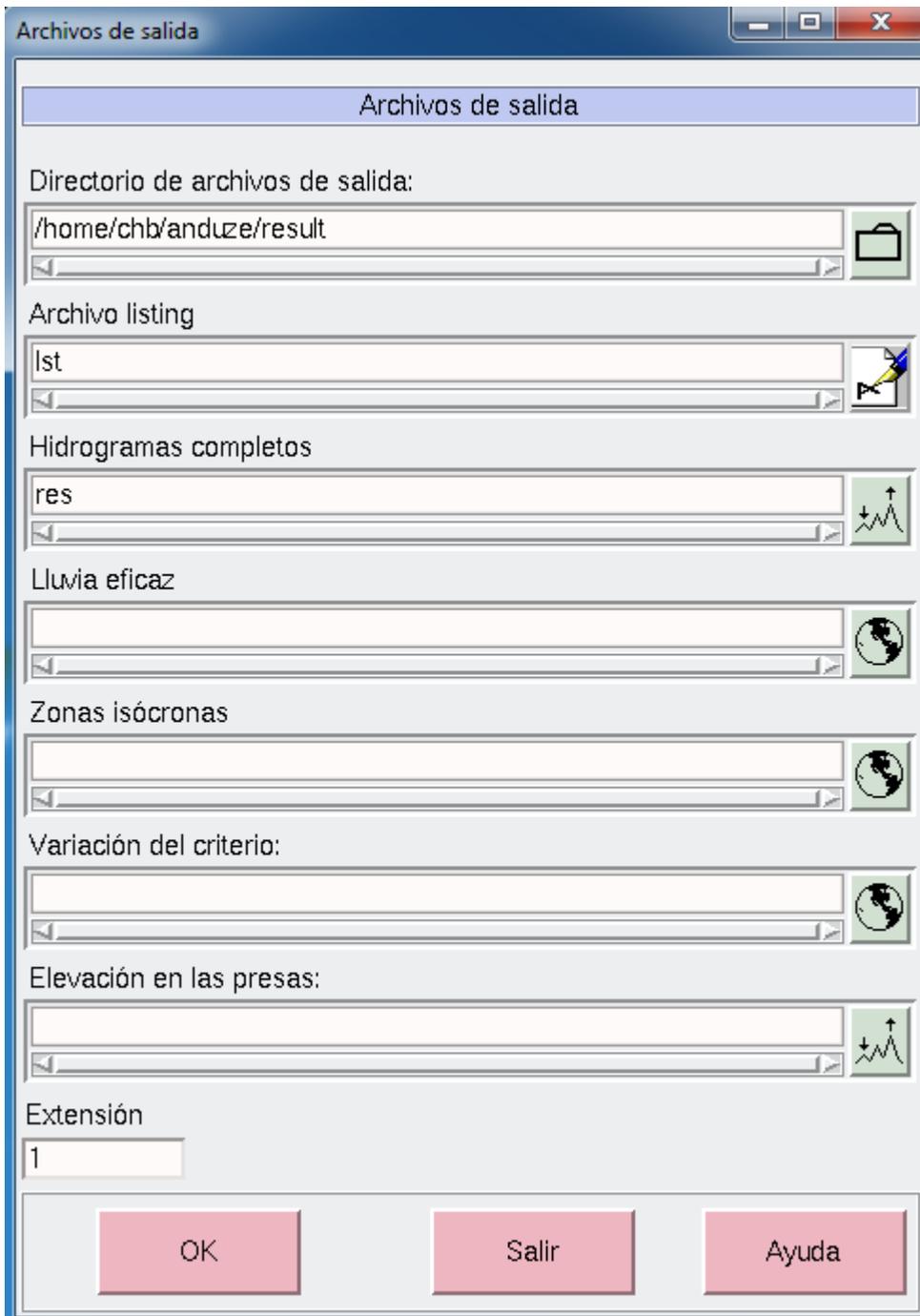


Figura 2.25

El primer campo de captura precisa el directorio en donde guardar el archivo.

El segundo campo *Archivo listing* permite nombrar el archivo en donde se guardarán las especificaciones y resultados de la simulación. Este archivo puede editarse directamente activando el

ícono. 

El tercer campo *Hidrogramas completos* designa el nombre del archivo de los hidrogramas simulados. Estos pueden visualizarse activando el ícono. 

El cuarto campo *Lluvia efectiva* restituye el archivo de las acumulaciones de volúmenes de escurrimientos por cada malla de la cuenca. Estas pueden visualizarse activando el ícono. 

El quinto campo *Zonas isócronas* restituye el archivo de los tiempos de recorrido de cada malla a la salida. Estos pueden ser visualizados activando el ícono. 

El sexto campo *Variación del criterio* genera una matriz de los valores de la función criterio asociada a un análisis de sensibilidad, en función de las variaciones de 2 parámetros. Esta matriz puede ser visualizada activando el ícono. 

La extensión será automáticamente agregada a los nombres de los archivos declarados. Así, el nombre res declarado en el campo *Hidrogramas completos* se guardará en el directorio /home/ATHYS/result bajo el nombre res.1. Este arreglo permite cambiar solamente la extensión durante diferentes simulaciones.

2.6. Ejercicios de aplicación

Simulación de un evento (ejercicio 1)

Este primer ejercicio tiene por objetivo familiarizarse con la utilización de MERCEDES. Se realizará una simulación de los eventos contenidos en el archivo base28.txt. Se utilizará el primer evento del archivo (n°2).

Además de los datos proporcionados, se indican también las coordenadas de la salida de la cuenca, en Anduze:

X = 732087; Y = 1896930.

Se usará:

Menú 1:

Cuadrícula 50×50

Menú 2:

Se selecciona únicamente la lluvia media, de la cual se indicará las coordenadas.

NB: La lluvia media puede ubicarse en cualquier punto del MDE, se tomará, por ejemplo: X=700000 e Y= 1900000

NB: en caso de una sola lluvia, el modo de interpolación es indiferente, Polígonos de Thiessen o inverso de la distancia

Menú 3:

Modo no continuo

Función de producción SCS con $S = 300$ mm, $CN = 0$, $\omega = 0.2$; $ds = 1$

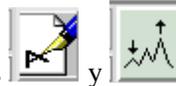
Función de transferencia Lag and Route simple con $V_0 = 1$ m/s; $\alpha = 0$; $K_0 = 0.7$; $K_1 = 0$

Menú 6 :

Archivo listing 1st

Hidrogramas completos res

Extensión 1



Para visualizar los resultados, se activan las teclas  y  del menú 6.

Comparación con un hidrograma observado (ejercicio 2)

Seleccionar en el menú 2 la estación hidrométrica Anduze, coordenadas $X = 732087$, $Y = 1896930$

Iniciar la simulación y comparar los hidrogramas observados y simulados.

Se tendrá cuidado en analizar bien los diferentes criterios de comparación entre los hidrogramas observados y simulados.

Modificación de los parámetros (o del modelo) (ejercicio 3)

Simular para diferentes valores de S (100, 200, 300 mm) y de V_0 (1, 2, 3 m/s). ¿Cómo evolucionan los hidrogramas en un caso o en el otro?

NB: las diferentes simulaciones llevarán extensiones numeradas 1, 2, 3, etc.

Comparación de 2 simulaciones (ejercicio 4)

Se comparará las simulaciones anteriores, realizadas con diferentes conjuntos de parámetros. Si res1 y res2 son dos simulaciones:

Abrir archivo res1 en Vishyr

Agregar estación



Escoger archivo res2

Seleccionar la estación a agregar

Activar la operación



Ok

Eventualmente, guardar el archivo original modificado

Simulación de una serie de eventos (ejercicio 5)

En el archivo de eventos hidro-pluviométricos utilizado anteriormente, se simulan los eventos n°2, 6 y 7 en serie, y se les compara con los hidrogramas observados.

Simulación con ayuda de una lluvia espacial (ejercicio 6)

Se sustituirá en el menú 2 la lluvia media por lluvias observadas localmente en las diferentes estaciones pluviométricas. Se verificará la localización de las estaciones pluviométricas con

respecto a la cuenca mediante el ícono



Se tomará un método de interpolación de tipo polígonos de Thiessen.

3. Calibración del modelo SCS-LR

Los parámetros de un modelo, en ciertas ocasiones, pueden ser escogidos en una primera aproximación en ábacos o en fórmulas extraídas de la literatura. Ejemplos: parámetro S del modelo SCS, o parámetro V_0 del Lag and Route. Los parámetros también pueden ser determinados a partir de estudios regionales, cuando éstos existan.

Sin embargo, se recomienda proceder a la calibración del modelo a partir de observaciones lluvia-caudal, cuando es posible. Actualmente, se conocen escasamente las relaciones que vinculan los parámetros de un modelo con las características de la cuenca, o del episodio. Los objetivos de la calibración consisten en definir el modo de empleo del modelo, cómo fijar los parámetros para cada episodio, cómo garantizar las mejores simulaciones. A continuación, proporcionaremos unos ejemplos.

3.1. Sensibilidad de las avenidas a las incertidumbres sobre los parámetros

Para el modelo SCS-LR, se admite que los parámetros a calibrar son S y V_0 (los otros parámetros son fijos, $ds = 1$, $\omega = 0.2$, $K0 = 0.7$, se admite que son características regionales del sur de Francia). Estos dos parámetros tienen efectos relativamente bien diferenciados: S está relacionado con el volumen y no modifica la calibración en el tiempo, V_0 se relaciona con el tiempo de subida y la posición del máximo, pero no modifica los volúmenes.

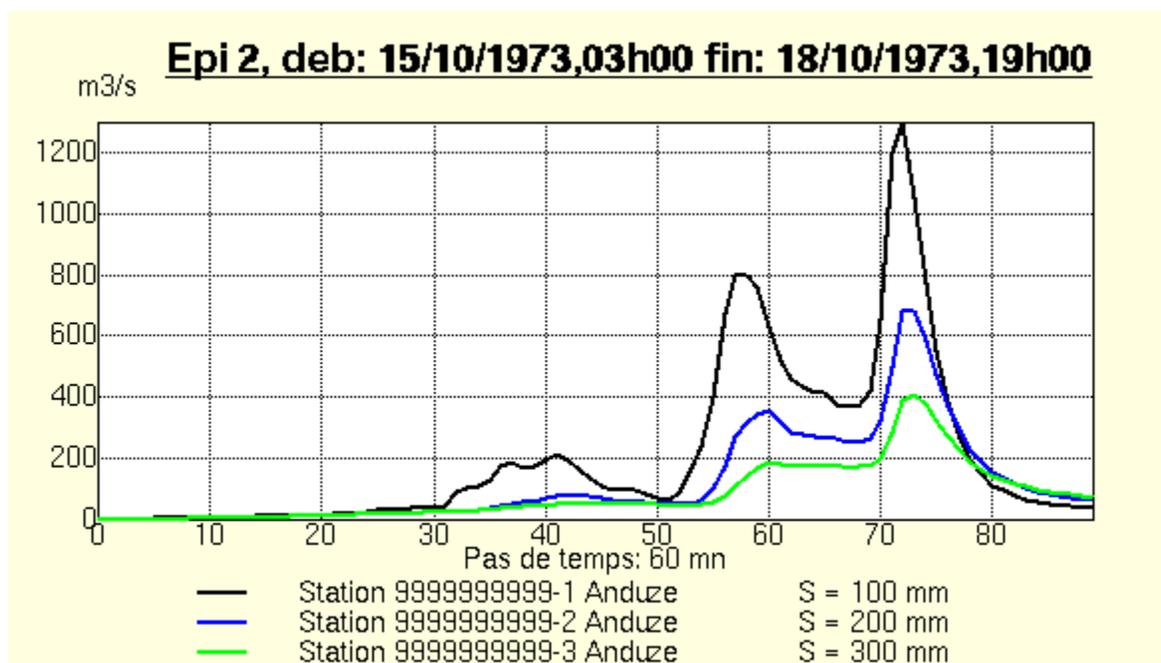


Figura 3.1

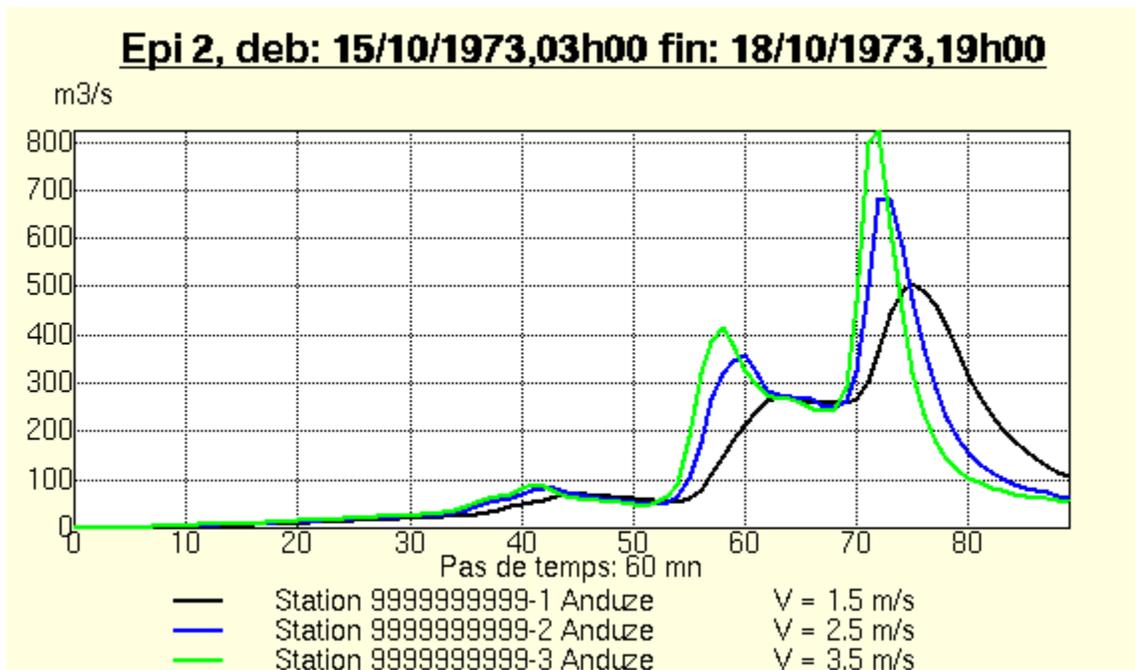


Figura 3.2

3.2. Calibración del modelo según las observaciones

Ejercicio: Se tomará de nuevo el episodio mencionado arriba (archivo base28.txt, episodio del 15/10/1973 al 18/10/1973) y se realizará una calibración manual de los parámetros S y V_0 . Por ejemplo, episodio n° 2, valores iniciales $S = 300 \text{ mm}$, $V_0 = 1 \text{ m/s}$, ¿Cuáles son los valores finales? Se buscará optimizar la función de error, por ejemplo, el criterio de Nash, y comprobar gráficamente el ajuste de los caudales calculados con los caudales observados.

Este ejercicio puede completarse con la utilización de procesos automáticos de calibración del modelo. El proceso de optimización consiste en determinar los parámetros asociados al valor óptimo del criterio (el más cercano a 1 para el criterio de Nash, el más cercano a 0 para los demás criterios), por medio del método iterativo Simplex (Rao, 1978). El análisis de sensibilidad representa el conjunto de valores del criterio en función de las variaciones de los parámetros, e informa sobre los diferentes valores admisibles entorno al conjunto “óptimo”, sobre la dependencia eventual de los parámetros, sobre la sensibilidad del modelo a cada parámetro.

Ejercicio: se procederá luego a una calibración automática del modelo sobre este evento. Entre las diferentes opciones de calibración, se escogerá: criterio de Nash, calibración simultánea, producción y transferencia, calibración sobre el hidrograma completo... Se podrá probar con diferentes opciones de calibración, y observar los resultados. ¿Cuáles son los valores finales de los parámetros? ¿Convienen esos valores al conjunto de episodios? ¿Cómo interpretar la variabilidad de los parámetros?

NB: Se tomará una muestra de mallas (10×10 o más) para disminuir el tiempo de cálculo en el marco de este ejercicio

Corrección del ejercicio (obtenido aquí con una división de malla de 10×10 y lluvias espaciales)

Análisis e interpretación de la variabilidad por evento de los parámetros:

N°	Fecha	S (mm)	Vo (m/s)	Qp (m3/s)	Qb (m3/s)	Nash
2	15/10/1973	168.7	2.6	477.1	1.8	0.95
6	11/09/1976	244.2	3.1	1009.1	15.6	0.92
7	08/11/1976	161.7	2.5	914.3	18.6	0.93
9	19/10/1977	258.2	2.6	1058.2	0.4	0.9
12	07/12/1977	145.0	3.1	418.5	27.0	0.88
21	22/09/1994	349.9	2.8	665.7	9.7	0.92
22	19/10/1994	336.5	2.5	814.0	16.3	0.91
23	02/11/1994	207.0	2.5	791.7	34.0	0.85
27	18/09/1995	215.2	3.6	672.9	41.0	0.84
28	03/10/1995	197.3	2.5	1096.2	38.0	0.7
29	13/10/1995	232.8	2.1	1247.9	27.0	0.92
34	11/01/1996	60.2	1.1	526.7	155.0	0.7
37	20/01/1996	123.7	1.2	689.3	91.0	0.1
54	03/11/1997	200.2	2.0	762.2	4.5	0.92
56	16/12/1997	183.4	5.6	1504.2	10.6	0.85
58	15/04/1998	163.4	2.0	368.5	3.9	0.86
59	29/04/1998	105.7	1.6	377.2	19.2	0.85
60	27/05/1998	98.2	2.2	472.9	13.0	0.85
65	17/05/1999	133.3	2.0	603.4	13.5	0.78
66	19/10/1999	233.5	2.8	685.8	37.0	0.98
70	28/09/2000	323.2	3.6	1224.6	3.4	0.99
79	09/10/2002	183.5	1.4	339.9	35.0	0.85
80	23/11/2002	67.4	2.0	567.8	103.0	0.94
81	09/12/2002	79.5	1.2	604.9	45.0	0.81
86	30/09/2003	300.2	2.4	452.3	9.3	0.94
87	15/11/2003	132.7	1.8	626.2	21.2	0.91
88	21/11/2003	84.7	1.9	940.1	40.0	0.89
89	29/11/2003	71.3	1.8	1071.7	46.0	0.85
	Media	180.7	2.4	749.4	31.4	0.8
	Desv. Est.	83.2	0.9	301.9	34.3	0.2

Tabla 3.1

Se observa una variación importante de S y de V_o , lo que hace que no se pueda adoptar fácilmente un valor medio para el conjunto de episodios.

S representa la altura del agua que se almacena al inicio del evento, y la variabilidad de S se explica por las condiciones iniciales de saturación de los suelos. Si se analiza las variaciones estacionales de S calculando un valor medio (azul) y una desviación estándar (rojo) para cada mes, se observa una variación característica, con un máximo al fin del verano en la gráfica siguiente. Pero las condiciones particulares de un año (sequía prolongada hasta octubre o noviembre, como fue el caso en 2007) no se toman en cuenta.

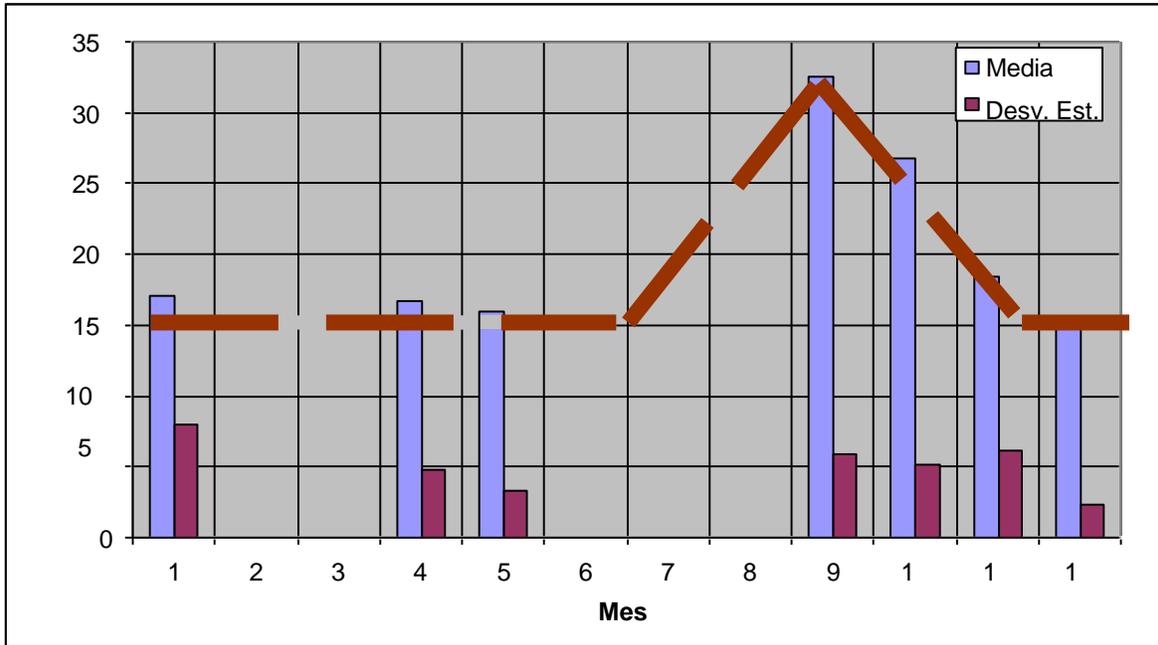


Figura 3.3

Para tomar en cuenta las anomalías estacionales, se puede tratar de vincular esa altura con un indicador del estado de saturación de la cuenca: por ejemplo el caudal de base.

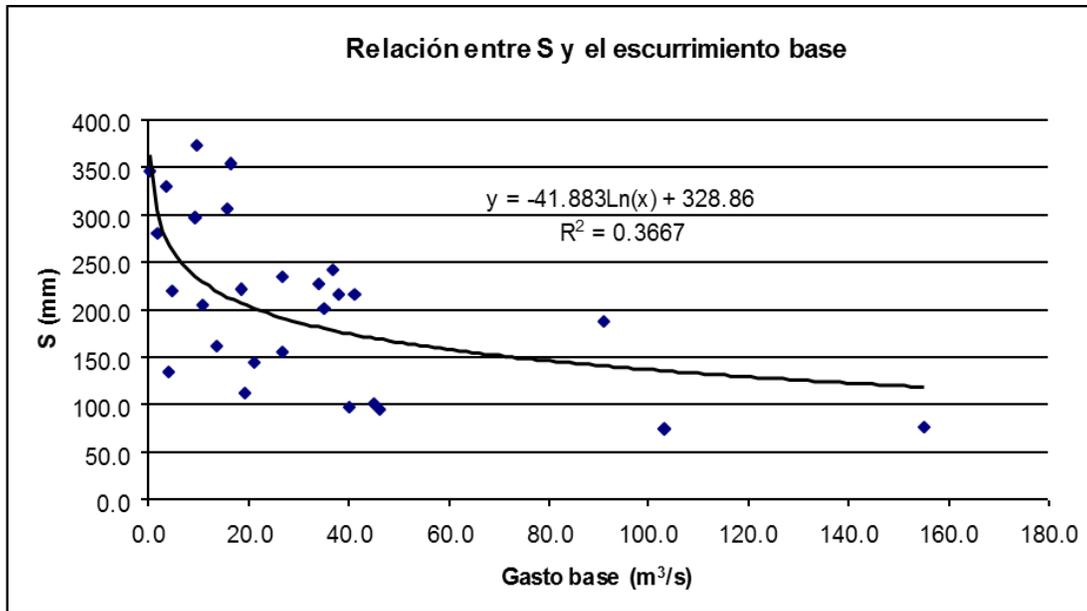


Figura 3.4

El parámetro S de la función de producción SCS puede inicializarse entonces según la relación:

$$S_{mm} = -41.8 \cdot \ln\left(Qb \frac{m^3}{s}\right) + 328.8$$

Otra posibilidad: índice Hu2 producido por el modelo SIM (Météo-France)

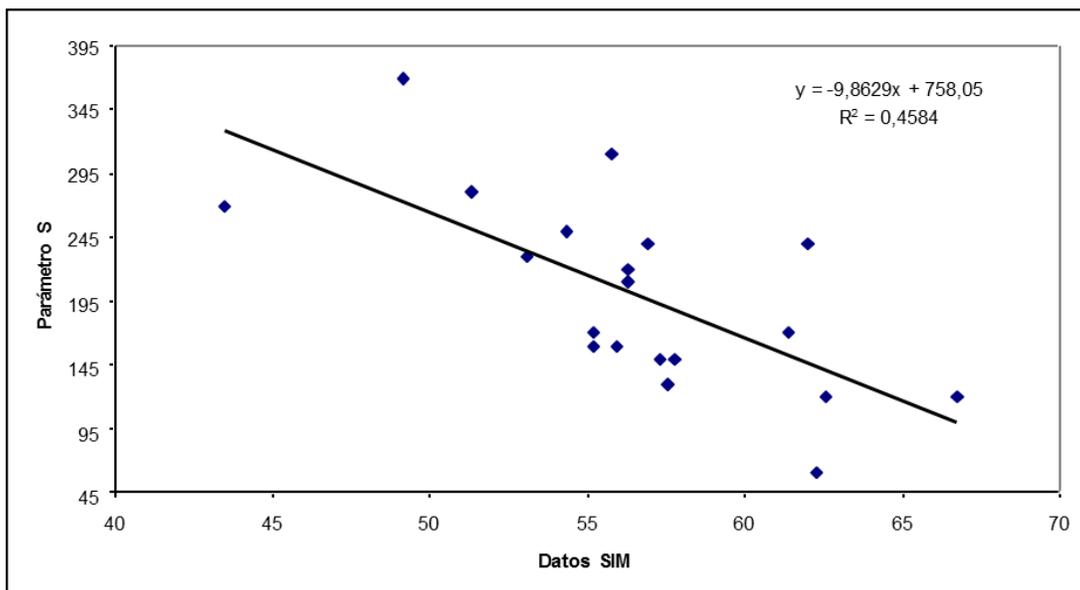


Figura 3.5

$$S_{mm} = -9.9.Hu2 + 758.1$$

En lo que se refiere al parámetro V_0 , no hay una correlación clara con, por ejemplo, el caudal máximo. Por otra parte, las simulaciones muestran que V_0 es menos importante que S sobre los resultados. Así, adoptar un valor medio para V_0 no influye tanto como para S .

3.3. Evaluación final del modelo

El éxito del modelo es indicado por los valores de funciones de error o de desviación entre valores observados y valores calculados:

$$\text{Criterio de Nash} = 1 - \frac{\sum(X_i - Y_i)^2}{\sum(Y_i - \bar{Y})^2}$$

Expresa por ejemplo el complemento a 1 del % medio de la desviación entre valores observados y valores calculados comparada al % medio de la desviación entre valores observados y el promedio de los valores calculados.

$$\text{Desviación cuadrática media } EQM = \frac{\sqrt{\sum(X_i - Y_i)^2}}{\sum Y_i}$$

Expresa el % medio de la desviación entre valores observados y calculados en relación al promedio de las observaciones

Además de la función error, el éxito del modelo puede también juzgarse de diferentes maneras:

- Por su rendimiento óptimo: es decir su capacidad de ajuste a las observaciones después de la calibración del modelo. En este caso, el criterio de Nash promedio, calculado para el conjunto de los 28 episodios, es del orden de 0.8, y varía entre 0.7 y 0.99. Por ajuste, el error sobre los caudales es por lo tanto, en promedio de 20% de la desviación estándar del valor medio del caudal.
- Por su rendimiento en proyectos de diseño, es decir su capacidad predictiva acerca de otros eventos distintos a los observados. A menudo, este rendimiento es el más interesante, en la medida en que informa sobre el éxito real del modelo, una vez que queda definida su forma de emplearlo para futuras aplicaciones.

En nuestro caso, el éxito del modelo en modo predicción puede ser evaluado simulando las avenidas con ayuda del parámetro S estimado por la regresión S_Hu2 ($R^2 = 0.48$). A continuación, se presenta un ejemplo comparativo entre los criterios calculados en la calibración, y los criterios calculados en modo predicción.

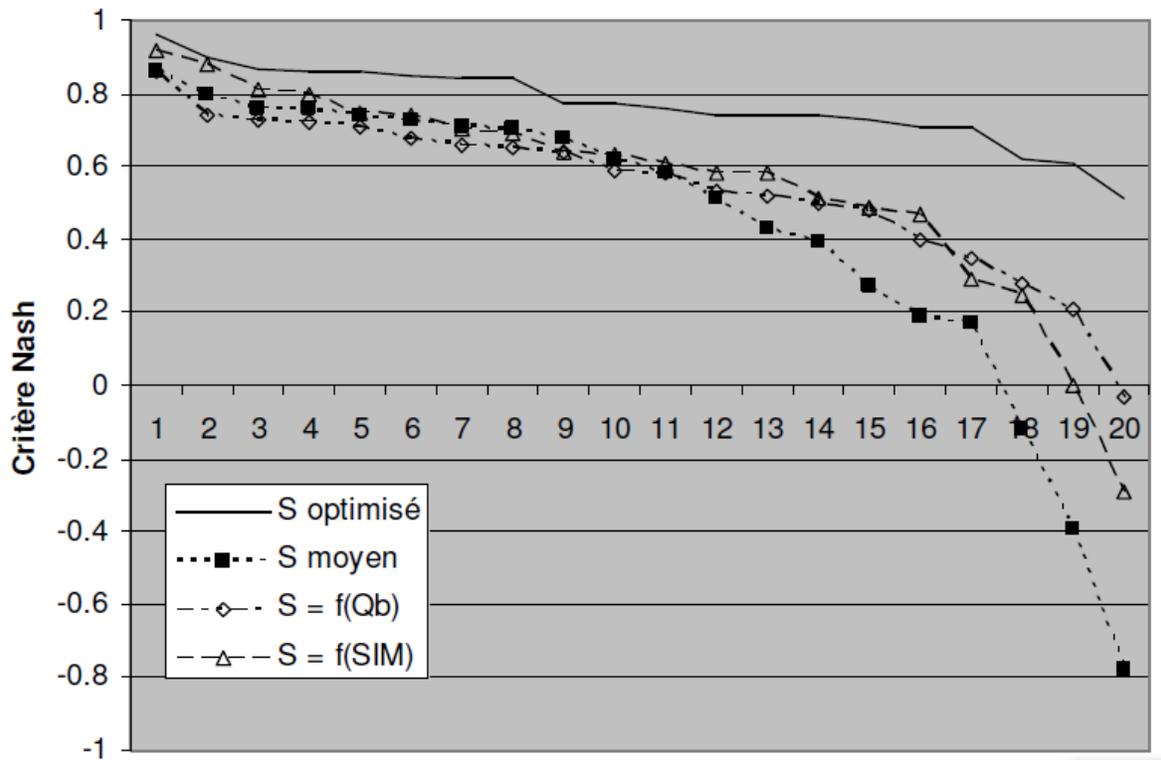


Figura 3.6

3.4. Consideración de la variabilidad por evento de un parámetro en MERCEDES

Es posible asignar a un parámetro dado un valor diferente para cada evento. El parámetro debe ser declarado como var1 (o var2, var3, ..., var6; respetar exactamente esta sintaxis), los valores de var1 siendo leídos en una ventana activada por el ícono  en el menú 3.

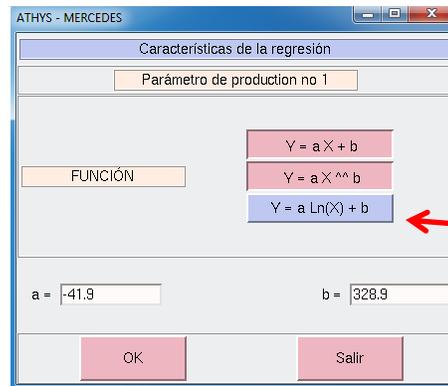
Cle classe	Fonction	Param 1	Param 2	Param 3	Param 4	
Homogène	SCS	var1	0	0.2	1	Appliquer



Figura 3.7



Figura 3.8



(10)

Figura 3.9

En este caso, var1 representa los caudales de base, var2 los valores óptimos de S y var3 los valores óptimos de V_0 . Si se decide asociar S con var2, los valores de S serán respectivamente 281.3, 307.3, etc., para los diferentes episodios simulados. Si se decide asociar S con var1, el cuadrado rojo indica que los valores var1 se utilizan en una regresión del tipo $Y = f(X)$, en donde Y representa el parámetro y X el valor var1. Se accede a esas regresiones haciendo clic directamente sobre los botones de la función deseada mostrados en la figura 3.9. (10)

Los valores de la figura 3.8 pueden ser capturados manualmente. También pueden ser leídos en un archivo externo, el cual debe tener la estructura siguiente:

2	1973	10150200	1.8	166.7	2.6	0	0	0
6	1976	9111500	15.6	242.1	3.1	0	0	0
7	1976	11082000	18.6	162.5	2.6	0	0	0
9	1977	10190500	0.4	251.4	2.5	0	0	0
12	1977	12071200	27	141.7	3.2	0	0	0
21	1994	9220100	9.7	345.2	3.0	0	0	0
22	1994	10190600	16.3	336.2	2.9	0	0	0
23	1994	11020900	34	191.2	2.3	0	0	0
27	1995	9180500	41	301.4	4.4	0	0	0
28	1995	10030200	38	189.3	2.5	0	0	0
29	1995	10130200	27	229.9	2.2	0	0	0
34	1996	1112100	155	67.5	1.3	0	0	0
37	1996	1200800	91	116.3	1.1	0	0	0
54	1997	11030400	4.5	190.4	1.9	0	0	0
56	1997	12161100	10.6	170.8	4.6	0	0	0
58	1998	4142300	3.9	149.9	1.8	0	0	0
59	1998	4291300	19.2	106.4	1.7	0	0	0
60	1998	5271200	13	100.2	2.3	0	0	0
65	1999	5170500	13.5	300.9	3.4	0	0	0
66	1999	10192100	37	235.5	2.8	0	0	0
70	2000	9281000	3.4	301.2	3.5	0	0	0
79	2002	10090200	35	177.4	1.3	0	0	0
80	2002	11231300	103	66.9	2.0	0	0	0
81	2002	12090700	45	78.1	1.2	0	0	0
86	2003	9301200	9.3	293.5	2.5	0	0	0
87	2003	11151100	21.2	129.6	1.9	0	0	0
88	2003	11210800	40	72.8	1.8	0	0	0
89	2003	11291800	46	65.5	1.7	0	0	0

Tabla 3.2

Las 3 primeras columnas contienen las características del episodio: n°, año, fecha de inicio. Las 6 siguientes contienen los valores que pueden ser asociados a un parámetro: var1 a var6. Cuando se lee el archivo externo, un test sobre las 3 primeras columnas condiciona la actualización de los valores var1 a var6.

NB: ese tipo de archivo se genera después de haber guardado una primera modificación de los valores var1 a var6.

Ejercicio: Se utilizará el archivo param.txt para simular las avenidas con valores variables del parámetro S : valores óptimos (var2) o regresión entre el logaritmo del caudal de base (var1) y el valor de S .

4. Impacto de la variabilidad espacial

Se supone que el modelo ha sido calibrado con anterioridad. Se admiten parámetros constantes ($S=200$ mm, $V_0=2,5$ m/s), que posteriormente podrán modificarse.

4.1. Impacto de la organización espacial de la lluvia

Ejercicio:

Se quiere analizar el efecto de la variabilidad espacial de la lluvia sobre los hidrogramas. Se van a simular los hidrogramas utilizando como entrada al modelo: a) la lluvia media, b) la lluvia espacial. Se utilizará el archivo base28.txt seleccionando como entradas pluviométricas la lluvia media para a), las lluvias locales y la interpolación por polígonos de Thiessen para b). Se comparará los hidrogramas de los episodios nº28 y 89 (ver ejercicio 4)

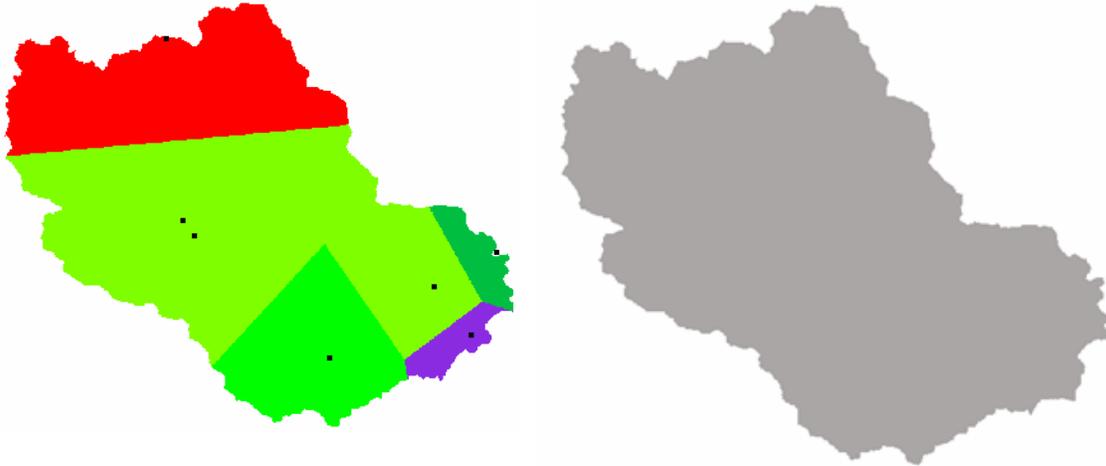


Figura 4.1

Corrección del ejercicio

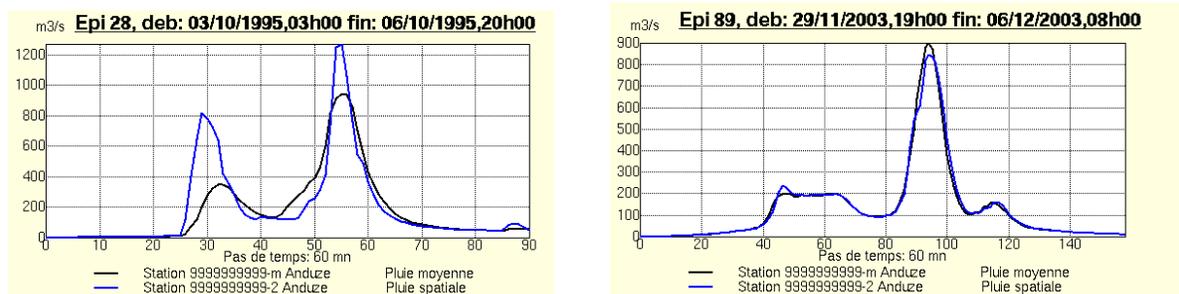


Figura 4.2

Los hidrogramas son diferentes en el caso del episodio 28, en donde el coeficiente de variación espacial ($CV = \sigma/m$) del campo de lluvias es del orden de 0.4 ($CV = 0.1$ en el caso del episodio 89). El modelo global tiene tendencia a subestimar los volúmenes y caudales pico de la avenida. Esas

diferencias se deben principalmente a la ubicación de la lluvia y a la no linealidad espacial del esquema de producción (no se obtiene el mismo volumen de escurrimiento aplicando una lluvia media y una lluvia variable en el espacio).

S = 300 mm ■ pluie moyenne ■ pluie spatiale

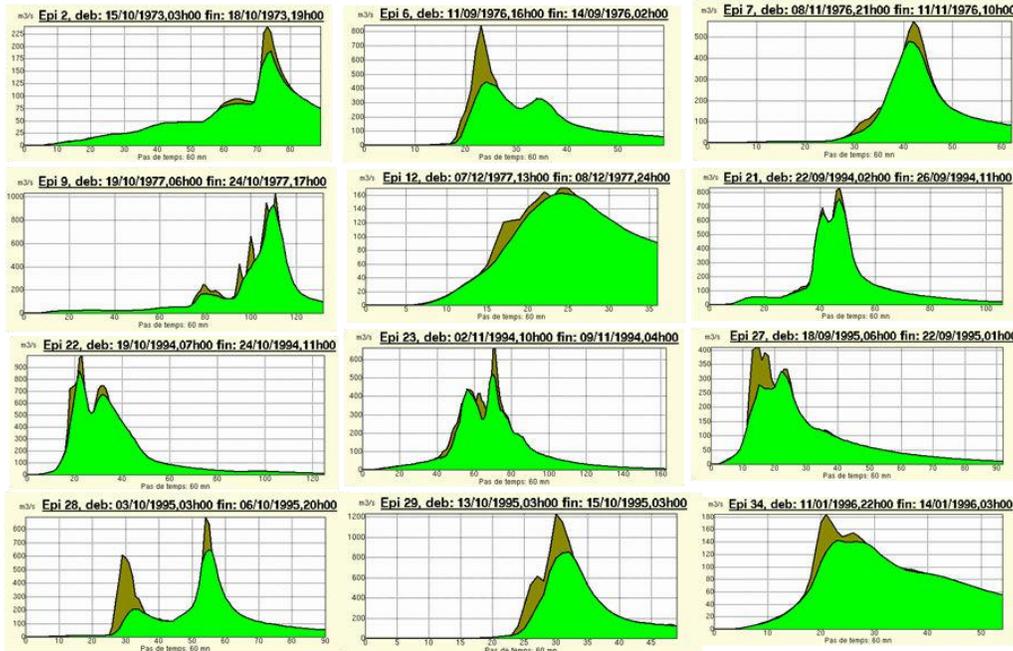


Figura 4.3

A parámetros idénticos, los volúmenes y los caudales de los picos de las avenidas son subestimados cuando se utiliza como entrada al modelo la lluvia media. El modelo distribuido asegura una mejor precisión en el cálculo de las avenidas, sin hacer más complejo el modelo (ningún nuevo parámetro fue introducido).

De manera más general, las diferencias pueden vincularse con el coeficiente de variación del campo de lluvia (Arnaud et al., 2002). Para un coeficiente de variación de 1 (muy parecido al de la lluvia de septiembre 2002 sobre el Gardon d'Anduze), la reducción de los volúmenes y de los caudales pico por el modelo global es alrededor de 30 a 40%.

a) basin 1

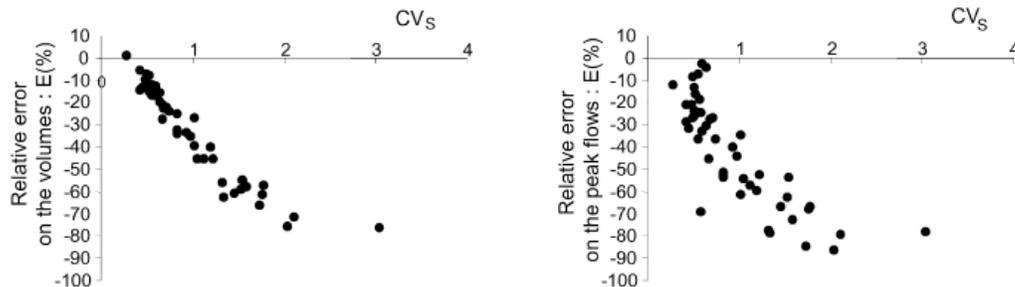


Figura 4.4

4.2. Impacto de la variabilidad espacial de los suelos

El modelo distribuido permite diferenciar las condiciones de producción (y de transferencia). ¿Es equivalente considerar un valor de permeabilidad (o una condición inicial) media sobre la cuenca, o tomar en cuenta la variabilidad espacial de esos valores?

Ejercicio: se quiere analizar el efecto de la variabilidad de los suelos (y de las permeabilidades correspondientes) en el cálculo de las avenidas. Se van a simular los hidrogramas utilizando a) una partición de la cuenca en 3 unidades de suelos cuyos valores del parámetro S son respectivamente $S=100$ mm, $S=200$ mm, $S=300$ mm (el valor medio de S es de 200 sobre la cuenca), b) una sola unidad con un $S=200$ mm para la cuenca en su conjunto. Se utilizará el archivo anduze.alt para diferenciar las funciones de producción:

alt<400 m	$S=100$ mm
400<alt<600 m	$S=200$ mm
600<alt	$S=300$ mm

Se compararán los hidrogramas de los episodios n°28 y 89 (ver ejercicio 4)

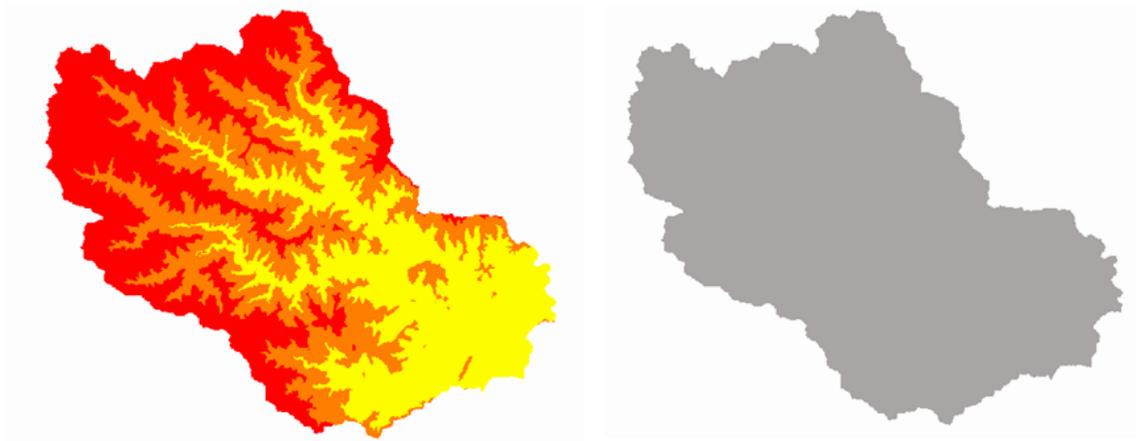


Figura 4.5

Corrección del ejercicio

Hay que diferenciar las clases de producción con ayuda del mapa de altitudes, se utilizará el archivo anduze.alt, y se definirán 3 clases de producción para altitudes: < 400 m, entre 400 m y 600 m, > 600 m, en el menú 1.

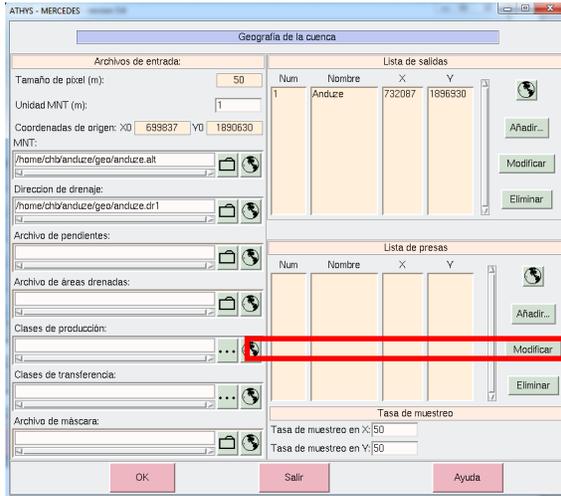


Figura 4.6

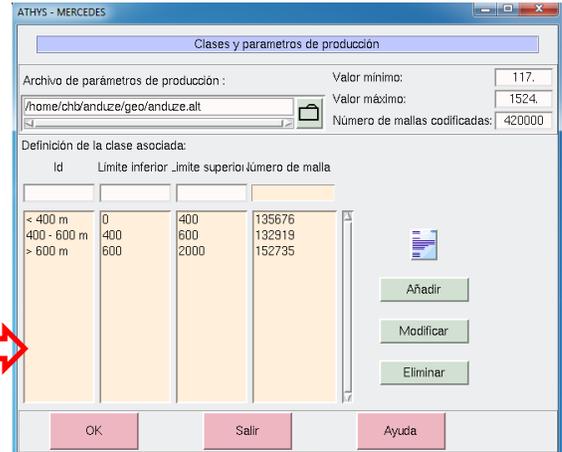


Figura 4.7

Una vez validadas, esas clases aparecen en el menú 3, en el cual las funciones de producción deben ser definidas.

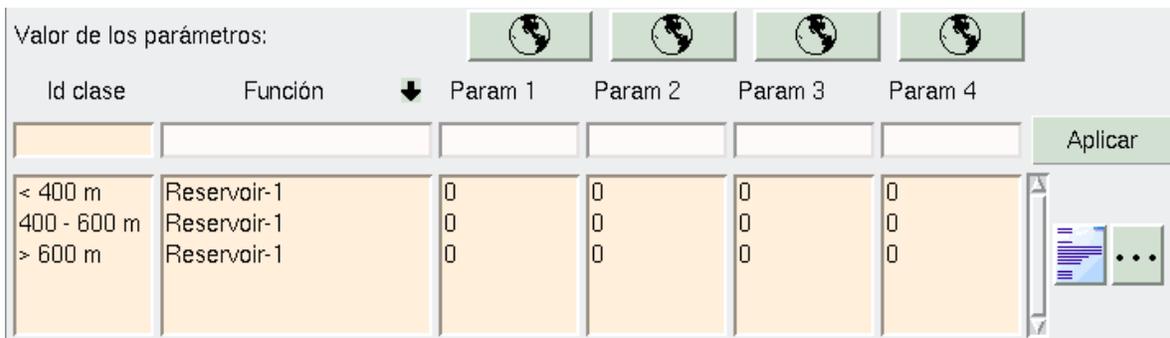


Figura 4.8

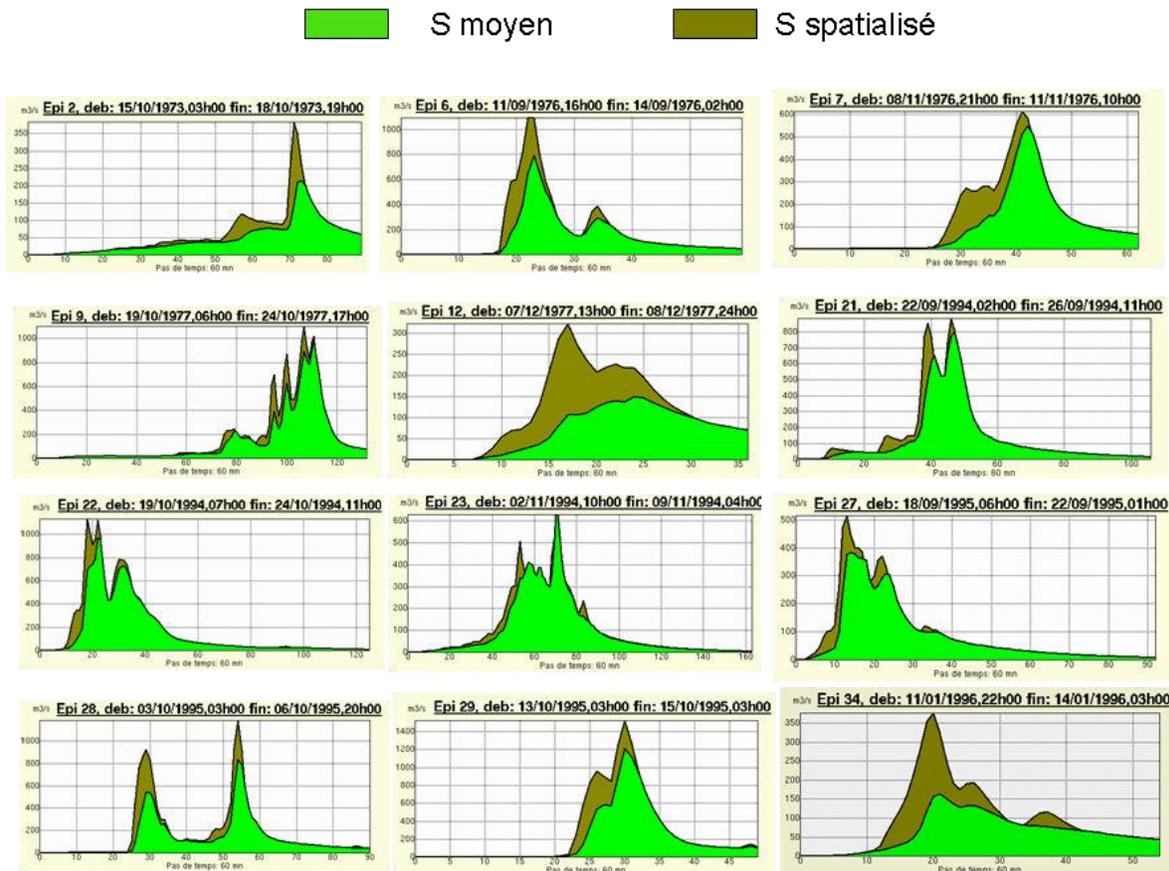


Figura 4.9

A lluvias iguales, una permeabilidad media tiende a subestimar los volúmenes y los caudales del pico de las avenidas. El modelo distribuido asegura por lo tanto una mejor precisión en el cálculo de la avenida, pero a cambio de un modelo más complejo (introducción de nuevos parámetros).

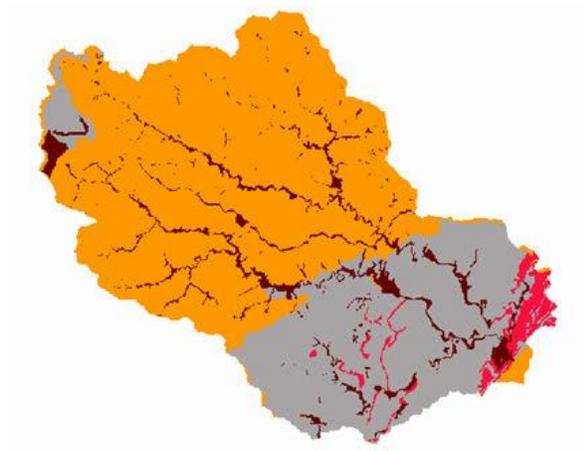
4.3. Impacto de modificaciones climáticas o geográficas

El modelo distribuido permite diferenciar las condiciones de producción (y de transferencia). Se pueden simular, por ejemplo, los efectos de la urbanización o de la creación de zonas agrícolas en una parte de la cuenca. O de las consecuencias de la caída de nieve a partir de cierta altitud.

Ejercicio: se quiere caracterizar el impacto de la urbanización sobre la cuenca (en gris). Se admite que $S = 20$ mm para la zona urbanizada. Se compararán las simulaciones realizadas con $S = 300$ mm en toda la cuenca, y con una partición de la cuenca constituida de $S = 20$ mm para la zona urbanizada, y $S = 300$ mm para el resto de la cuenca. Se utilizará el archivo anduze.sol, constituido de 9 clases de permeabilidad de suelos, codificados de 1 a 9.



Zona de 1 a 9, $S=300$ mm



Zonas 1 à 3 $S = 300$ mm
Zonas 4 à 9 $S = 20$ mm

Figura 4.10

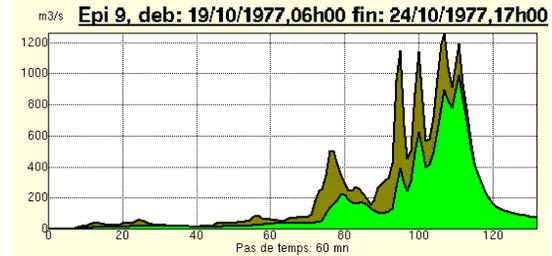
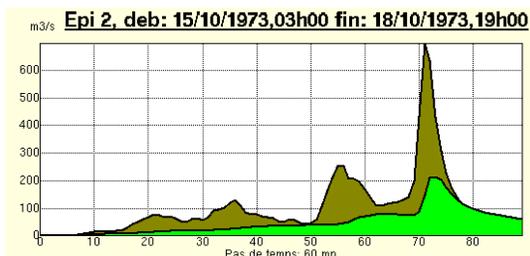


Figura 4.11

Ejercicio: se quiere observar la influencia de la nieve en un episodio de avenida. Se supone que varias situaciones pueden ser observadas, en función de un límite altitudinal. Comparar las situaciones siguientes:

- (a) Condiciones normales sobre la cuenca

- (b) Caída de nieve arriba de 600 m (lo que se traduce por $S = 100000$ mm y $ds = 0$, almacenamiento total de la caída de nieve)
- (c) Lluvia sobre el manto de nieve o suelos congelados arriba de 600 m (traducido por $S = 0$, escurrimiento total)

Se utilizará el archivo de alturas anduze.alt para definir las diferentes clases de producción.

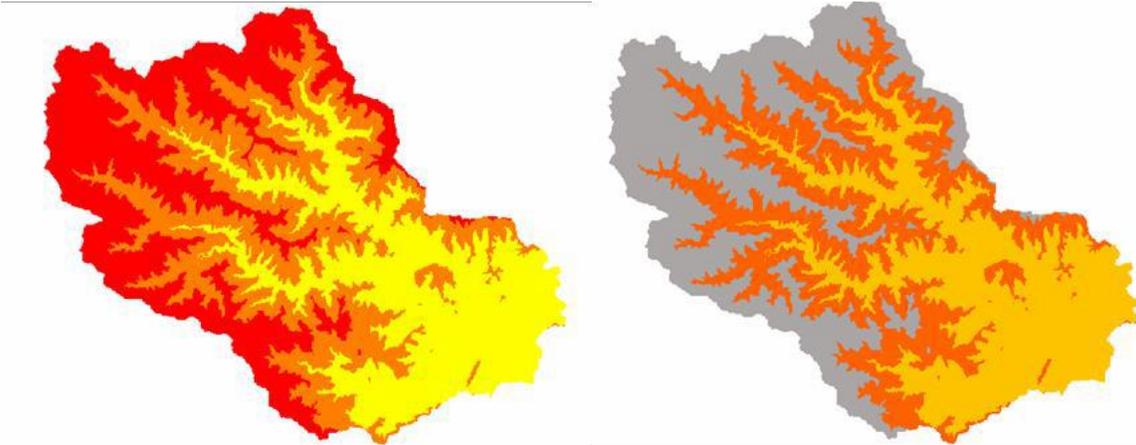


Figura 4.12

Corrección del ejercicio

Hay que diferenciar las clases de producción con ayuda del mapa de las altitudes, se utilizará el archivo anduze.alt, y se definirá 2 clases de producción, para altitudes: < 600 m y > 600 m, en el menú 1 (véase figuras 4.6, 4.7 y 4.8).

A continuación, se aplicará la función SCS, con un $S \gg$, lo que se traduce en un almacenamiento casi total de la precipitación bajo forma de nieve en el caso (b), y con un $S = 0$, lo que se traduce en escurrimiento casi total sobre la nieve o suelo congelado en el caso (c).

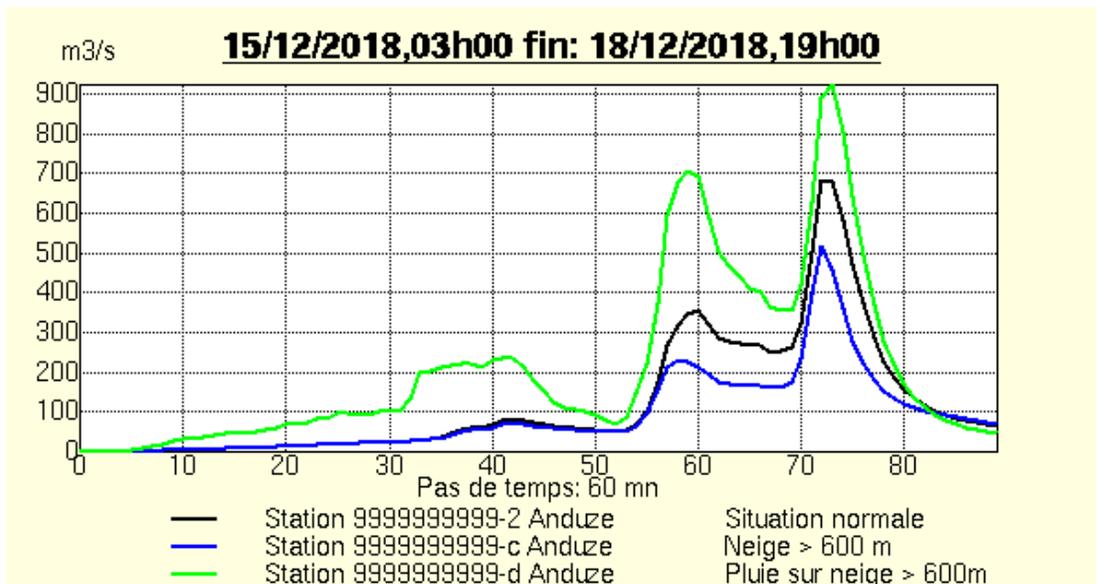


Figura 4.13

4.4. Reflexiones sobre la selección de datos

Preguntas:

- ¿Cuál es el tamaño óptimo de la malla de discretización de la cuenca?
- ¿Cuál es la resolución óptima de la malla de lluvia de radar?

4.4.1. Sensibilidad a la discretización espacial de la cuenca

La discretización espacial de la cuenca se basa en la utilización de un Modelo Digital de Elevaciones, cuya malla puede variar en función de los datos disponibles, o de diversas operaciones de selección disponibles en Vicair o Mercedes. Se estudiará aquí la sensibilidad de las simulaciones de avenida en función de la selección practicada en Mercedes, para un MDE cuya malla es de 50 m:

Selección 1: todas las mallas, o sea una resolución de 50 m

Selección 2: 1 malla de cada 10, o sea una resolución de 500 m

Selección 3: 1 malla de cada 50, o sea una resolución de 2500 m

Selección 3: 1 malla de cada 100, o sea una resolución de 5000 m

Selección 4: 1 malla de cada 200, o sea una resolución de 10000 m

La selección practicada en Mercedes consiste en seleccionar una malla de cada N en X y una malla de cada N en Y, y luego aumentar la superficie de esta malla de un factor N x N. El modelo opera entonces sobre un número de mallas reducido en un factor N x N sobre la cuenca.

Modo operativo

Se utilizará como datos iniciales:

Anduze.mnt *modelo digital de elevaciones*
 Anduze.dr1 *modelo de drenaje*
 Base28.txt *archivos de los episodios lluvia caudal*
 SCS ($S = 400$, $\omega = 0.2$, $ds = 1$), Lag-route ($V_0 = 3$, $K_0 = 0.7$)

Las simulaciones se superpondrán con ayuda de la función *Agregar estación* de Vishyr.

Ejemplo de los resultados

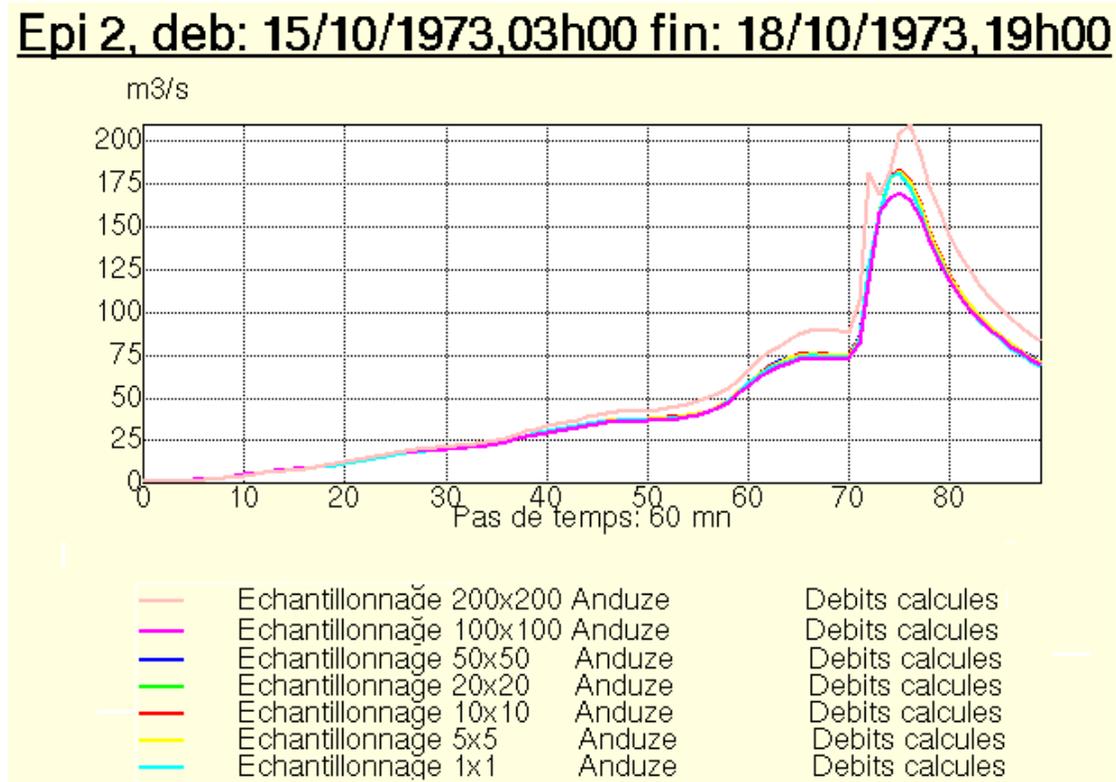


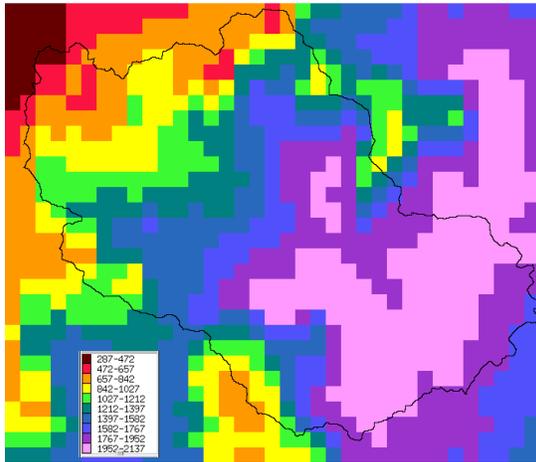
Figura 4.14

Las simulaciones son casi idénticas hasta la selección 50 x 50, antes de disminuir su precisión. El número de mallas correspondiente a un tasa de muestrea 50 x 50 es 87, lo que sería el numero de mallas ideal para simular la avenida! La resolución espacial que corresponde es 2500 m.

¿Se obtienen los mismos resultados para los otros episodios? Para otros modelos ¿

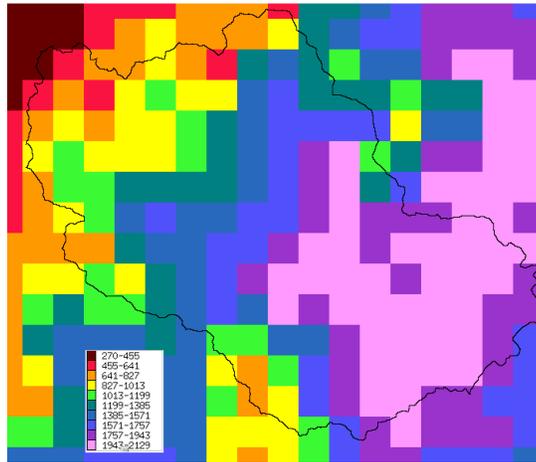
4.4.2. Sensibilidad a la resolución espacial de las lluvia de radar

Los radares meteorológicos de la red ARAMIS permiten medir la lluvia con un intervalo de tiempo de 5 min, y para pixeles de 1 km². Las medidas se basan en la reflectividad de una onda electromagnética generada por el impacto de ésta en las gotas de agua de lluvia, la cual es función del diámetro de las gotas. La reflectividad R se vincula luego con la intensidad de la lluvia Z por una relación del tipo Marshall-Palmer $Z = aR^b$.

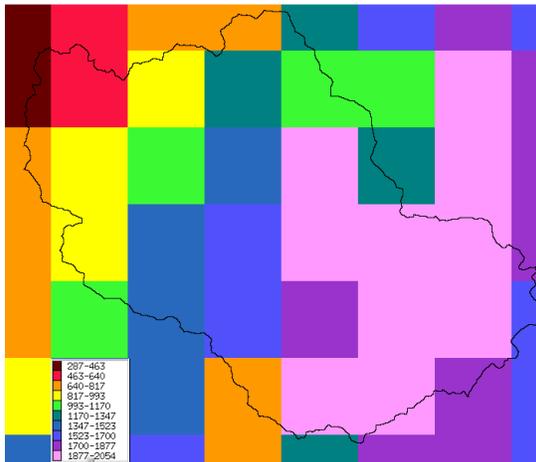


Radar 1x1 km²

Pmed = 150.5 mm

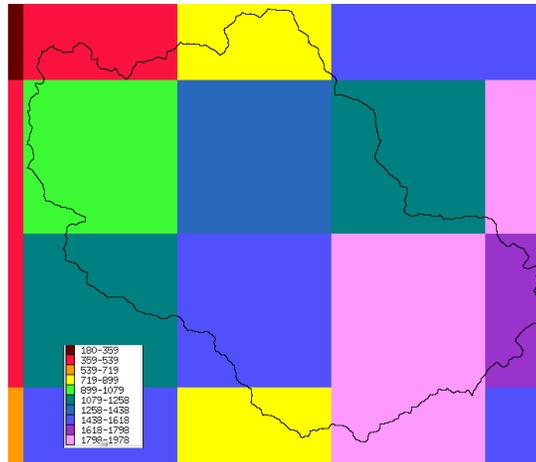


Radar 2x2 km² Pmed = 151.0 mm



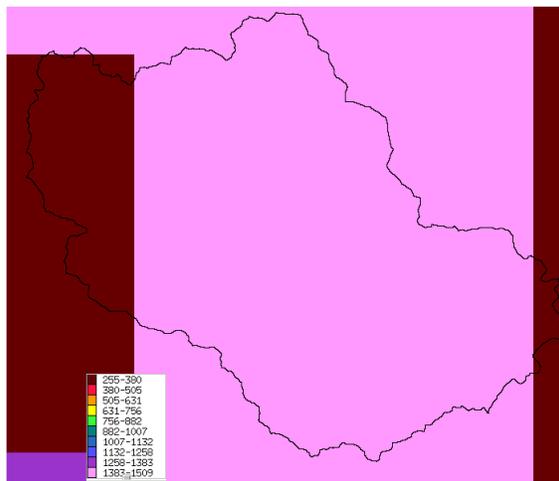
Radar 5x5 km²

Pmed = 146.9 mm



Radar 10x10 km²

Pmed = 140.8 mm



Radar 25x25 km²

Pmed = 150.9 mm

Figura 4-15

La medida de la lluvia no es por lo tanto una medida directa, y está sujeta a diversas incertidumbres, debidas tanto al dispositivo de medición como al sistema que provoca las precipitaciones. Sin entrar en detalles, eso significa que una corrección del dato de radar en función de la lluvia observada en el suelo es generalmente necesaria. Diversos productos están actualmente disponibles: imágenes Antilope y Panthere de Meteo-France, imágenes Calamar de Rhea...

La pregunta que se plantea aquí, es saber cuál es la sensibilidad de las simulaciones de los modelos a la resolución de la lluvia de radar. ¿Es imprescindible conservar una resolución de un km^2 ? ¿Cuál es la pérdida de precisión si se selecciona solamente un pixel de radar de cada 2, de cada 3, etc.?

Se estudiará aquí la sensibilidad de las simulaciones de las avenidas en función de la selección practicada en las imágenes de radar, cuya resolución inicial es de 1 km^2 .

Selección 1: 1 pixel de cada 2, o sea una resolución de 4 km^2

Selección 2: 1 pixel de cada 3, o sea una resolución de 9 km^2

Selección 3: 1 pixel de cada 5, o sea una resolución de 25 km^2

Selección 4: 1 pixel de cada 10, o sea una resolución de 100 km^2

Selección 4: 1 pixel de cada 25, o sea una resolución de 625 km^2

NB: la selección practicada en la imagen de radar consiste en calcular el valor medio en cada cuadrado seleccionado, o sea 4 km^2 para una selección de 1 pixel de cada 2.

Modo operativo

Se utilizará como datos de base:

Anduze.mnt *modelo digital de elevaciones*

Anduze.dr1 *modelo de drenaje*

200901021200.grd, 200901021205.grd... *Fichier radar Panthere (Archivos de radar Panthere)*

SCS ($S = 200$, $\omega = 0.2$, $ds = 1$), Lag-route ($V_0 = 3$, $K_0 = 0.7$)

Los archivos de los episodios lluvia-caudal se constituyen a partir de los datos de radar, utilizando diferentes selecciones: 1, 2, 3, 5, 10, 25. Los archivos se encuentran en el directorio *radar_panther*. Se utilizará la función de Vishyr Fichier/Calamar-Panthere → txt para constituir los archivos en entrada de Mercedes (ver párrafo 8.4.2) Las fechas del episodio que se analiza se ubican entre el 01/02/2009 a las 12:00 pm y el 03/02/2010 a las 2:00 pm.

Las simulaciones se superponen con ayuda de la función *Agregar estació* de Vishyr.

Resultado:

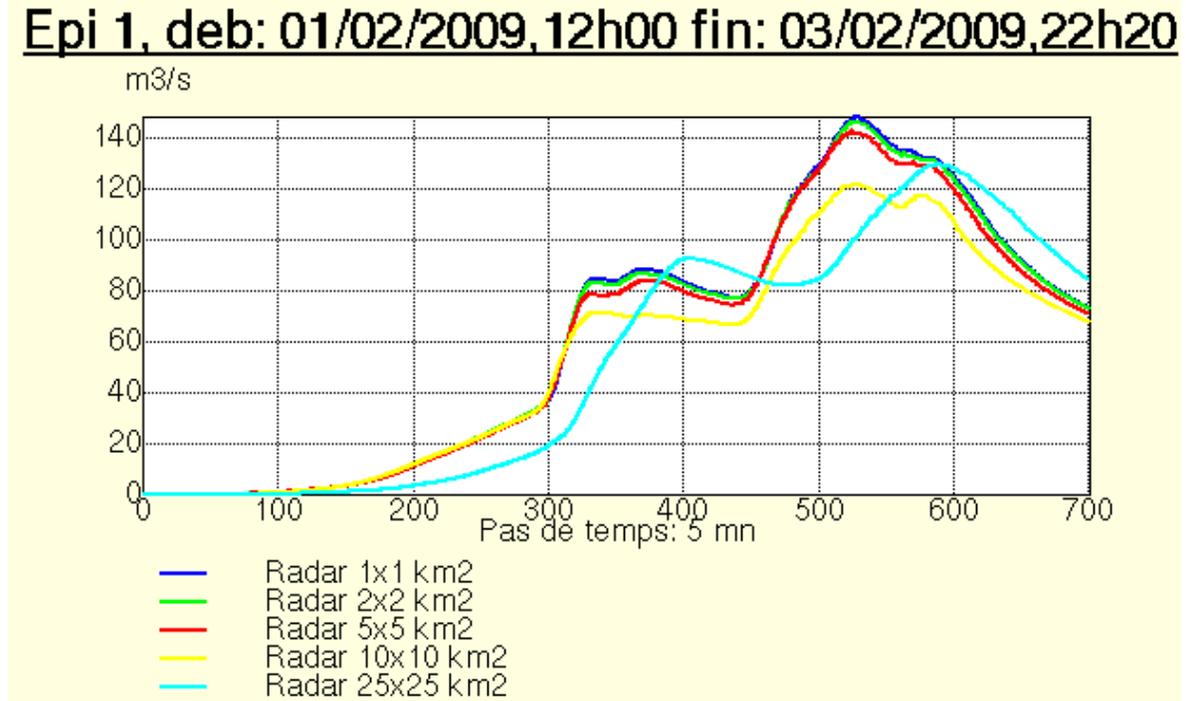


Figura 4-16

Las simulaciones son prácticamente idénticas para resoluciones de hasta 5 km, lo que corresponde a 22 píxeles de radar en la cuenca. Más allá, se nota una sensible pérdida de precisión. Para este episodio, se concluye que 22 píxeles de radar, en promedio, son suficientes para el análisis de la variabilidad espacial de la lluvia.

5. Aplicación del modelo de la onda cinemática (transferencia)

5.1. Presentación del modelo

La función de transferencia Onda Cinemática realiza una transferencia de los escurrimientos aguas arriba hacia aguas abajo en cada una de las mallas de la cuenca. Para cada tiempo de cálculo, y para cada malla, se dispone de un balance de los volúmenes almacenados, tomando en cuenta las aportaciones aguas arriba, del almacenamiento inicial al principio del intervalo de tiempo y del volumen escurrido aguas abajo. Esta función ofrece varias ventajas con respecto a una función de transferencia tipo Lag and route:

- i) Una representación física de las velocidades de escurrimiento, que pueden variar en función de la carga hidráulica, se estima según los perfiles de las secciones transversales...
- ii) La posibilidad de tratar los casos más complejos, los cuales necesitan un conocimiento de los volúmenes reales transitados sobre cada malla, para cada intervalo de tiempo: almacenamiento en una represa o zonas de desbordamiento, infiltración en el lecho del río durante la transferencia...

En cambio, los tiempos de cálculo son más largos, y los resultados pueden ser influenciados por la resolución espacial escogida para la discretización en mallas cuadradas.

Las ecuaciones del modelo son:

- La ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

en donde Q representa el caudal (en m^3/s), A la superficie de la sección mojada (en m^2), x la abscisa (en m) y t el tiempo (en s).

- La ecuación dinámica, fórmula de Manning-Strickler, en la cual se desprecia las pérdidas de energía por fricción:

$$Q = K S_f^{1/2} R_h^{0.66} . A$$

en donde K representa el coeficiente de Manning- Strickler, en $\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$, S_f la pendiente del fondo (en m/m), y R_h el radio hidráulico (es la división del área hidráulica entre el perímetro mojado), en m.

En MERCEDES, este esquema se aplica según los principios siguientes:

- Se considera que un canal rectangular de ancho λ , y de profundidad P_c cruza cada malla sobre toda su longitud. La dirección del canal se determina por la dirección del drenaje deducida del MDE (o sea 8 direcciones posibles, de 45° en 45°)
- Se desprecia los tiempos de transferencia del agua que escurre sobre la malla hacia el canal. El tiempo de transferencia sobre la malla es por lo tanto el tiempo de transferencia del escurrimiento en el canal.
- Cuando la altura del agua en el canal rebasa la profundidad del mismo, el escurrimiento se realiza entonces en una sección de llanura izquierda y derecha compuesta de dos rectángulos superpuestos.

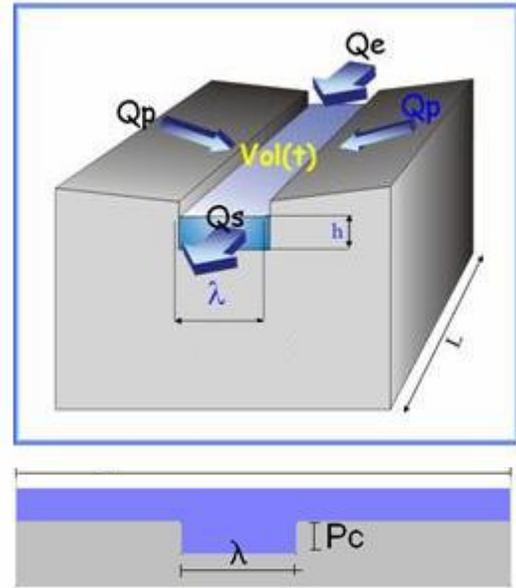


Figura 5-1

La estabilidad numérica del sistema se asegura por la condición de Courant.

Parámetros del modelo

En el esquema intervienen 4 parámetros:

K_I : coeficiente de Manning-Strickler en el cauce menor, en $m^{1/3} \cdot s^{-1}$

λ : ancho del canal, en m

P_c : profundidad del canal, en m

γ : coeficiente que toma en cuenta las aportaciones aguas arriba para el cálculo de las pérdidas del escurrimiento, adimensional.

Las pendientes se calculan en el modelo a partir del MDE, y corresponden para cada malla a la diferencia de altura entre aguas arriba y aguas abajo en la dirección del escurrimiento, dividido entre la longitud de la malla.

Para calibrar el modelo, se utilizará un ancho de escurrimiento de 50 m sobre la totalidad de la cuenca. La profundidad del canal será infinita.

NB : después de la versión 5.6, un nuevo modo de computación de las pendientes ha sido utilizado, y es posible que cambie la calibración del parámetro K_I . Los resultados siguientes han sido obtenidos con la nueva computación de las pendientes.

Resultados

Se consideran de nuevo los 28 eventos de la selección. La función de producción es la función SCS. Los parámetros que hay que calibrar son el parámetro S de SCS y el parámetro K_I de la Onda Cinemática.

Comentarios

Se obtienen buenos resultados con $K_I = 5$ a $10 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$, Sin embargo, estos valores quedan bastante alejados de los valores usualmente empleados para describir la rugosidad de los lechos naturales ($\sim 20 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$), ¿cómo explicarlo?

- i) Se nota que este valor depende parcialmente de los valores escogidos para el ancho, o la forma de las secciones de escurrimiento. Se verificará el impacto del ancho del escurrimiento sobre los hidrogramas, seleccionando un ancho de 10 o 100 m.
- ii) Las pendientes procesadas desde el MDE pueden ser afectadas de errores, que impactan la calibración de K_I . Intentar suavizar dichas errores por medio de la función de alisamiento disponible en Vicair (*Operaciones/Alisamiento*)
- iii) El factor de muestra que se utilizó, 50x50, puede ser grueso y se intentara utilizar otros factores, 5x5, 10x10, para uno o dos episodios.
- iv) Las condiciones de transferencia en las laderas de la cuenca son probablemente muy diferentes de aquellas en la red de cauces. En la parte alta de la cuenca, el escurrimiento presenta una baja carga hidráulica, los coeficientes de rugosidad correspondientes son probablemente del orden de 1, o menores. Se puede verificar realizando una partición de las clases de transferencia:

Red ($S > 25\text{ha}$)	→	$K_I = 20 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$
Ladera ($S < 25 \text{ ha}$)	→	$K_I = 1 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$

(Utilizar el archivo de las superficies drenadas, ver función de tratamiento de los MDE – archivos derivados del modelo de drenaje – Archivo de las superficies drenadas de VICAIR)

5.2. Aplicación a la simulación del impacto de represas



Figura 5.2

La estructura distribuida se presta a la consideración de represas en la cuenca.

NB: para la simulación de represas, es indispensable utilizar funciones de transferencia en modo de mallas interactivas, por ejemplo, el modelo de la onda cinemática. Esas funciones son, en efecto, las únicas que permiten conocer los volúmenes almacenados en cada malla para cada intervalo de tiempo.

La introducción de una represa se desarrolla en 2 etapas:

- 1) La represa debe ser declarada por sus coordenadas en el menú 1 “Cuenca vertedora”
- 2) El funcionamiento de la represa tiene que ser definido por llenar la correspondencia entre Nivel del agua, Volumen almacenado y Caudal de salida de la represa.

La primera etapa consiste en introducir las coordenadas de las represas utilizando la opción Agregar en el rubro *Lista de represas* en el menú *Cuenca vertedora*. **(11)**

Se proporciona las coordenadas siguientes:

Represa R	X= 726212	Y=1901101
Represa J	X= 712037	Y=1910680
Represa O	X= 723287	Y=1905730
Represa V	X = 708737	Y=1906330

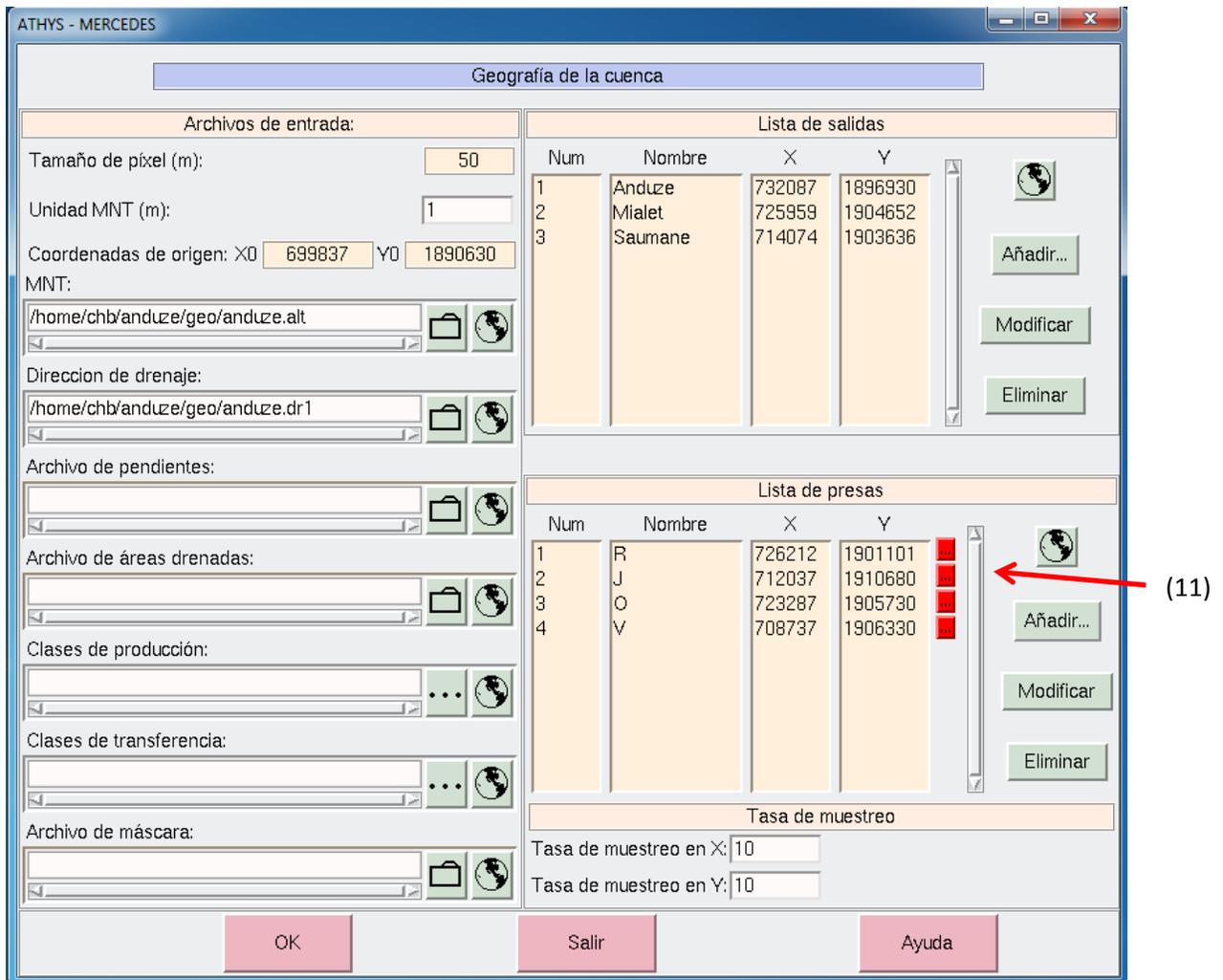


Figura 5.3

Se verificará que esas coordenadas corresponden realmente a las cuencas vertedoras controladas por las represas, con ayuda de la función de control  ubicada en el rubro *Lista de presas*.

Las represas habiendo sido anteriormente declaradas, se define para cada presa las características de su funcionamiento a través de una tabla de correspondencia entre nivel del agua, volumen almacenado y caudal de salida de la represa. Dicha tabla se activa al clicar sobre el botón a la derecha de la presa.

Lista de presas				
Num	Nombre	X	Y	
1	R	726212	1901101	...
2	J	712037	1910680	...
3	O	723287	1905730	...
4	V	708737	1906330	...


 Añadir...
 Modificar
 Eliminar

Figura 5.4

ATHYS - MERCEDES					
Características de la presa 1					
Archivo de características:					
/home/chb/anduze/ret/ret1					
Elevación (m)	Volumen (Mm3)	Caudal de salida (m3/s)			
			volumen inicia ...		
251.63	0	0	Añadir Modificar Eliminar		
255	0.8	0			
260	5	20			
270	10	50			
280	25	100			
OK		Salir		Ayuda	

Figura 5-5

El caudal de salida puede simular el funcionamiento de una puerta de la presa, o pérdidas por infiltración/evaporación, etc... Los niveles de agua no son directamente utilizados en el

procesamiento de los caudales, pero están registrados para representar la dinámica de la presa en el el transcurso del episodio.

La última línea de la tabla corresponde a la capacidad de almacenamiento de la presa, aquí 25 millones de metros cúbicos. Cuando los volúmenes en la presa excedan este valor, se considera que no hay almacenamiento y que los caudales que salen de la presa están los mismos que los que entran.

Las variaciones de los niveles de agua están registradas en un archivo que tiene que ser declarado en el menú 6 de Mercedes, Archivos de salida. Los niveles de agua están expresados en m.

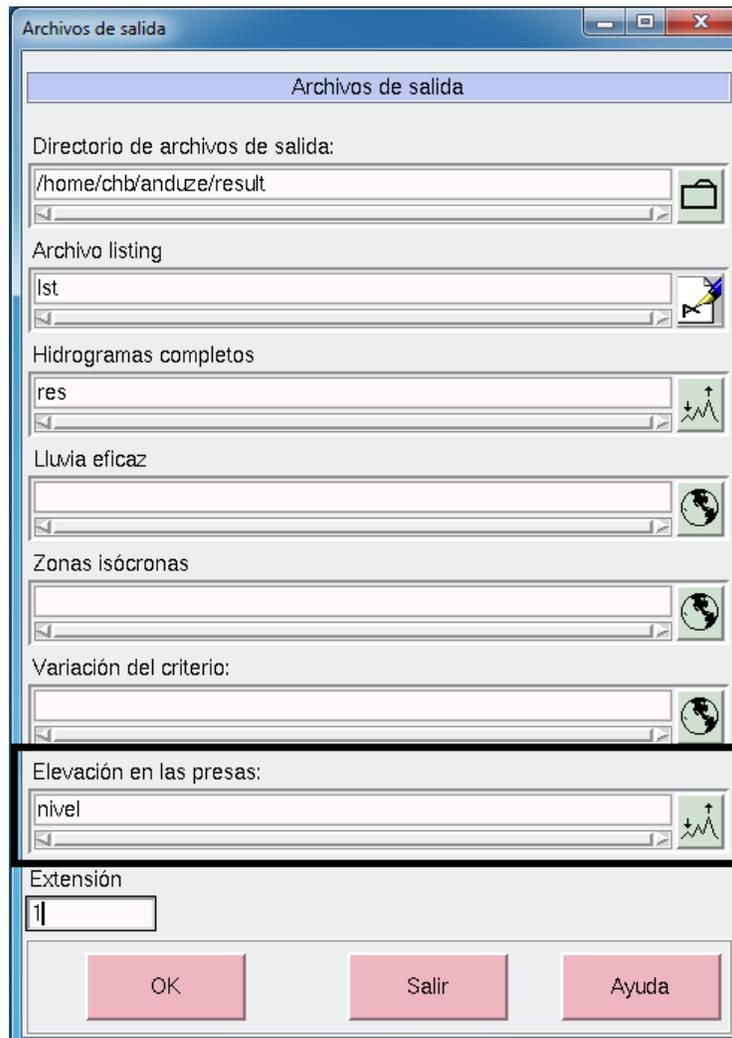


Figure 5-6

Ejercicio: simular el impacto de las represas sobre la avenida del episodio n°32, a la salida de la cuenca. Se seleccionarán los parámetros siguientes:

Producción: SCS $S = 230.7$ mm, $Ia/S = 0.2$, $\omega = 0.2$, $ds = 1 \text{ d}^{-1}$, para las mallas de la cuenca

Transferencia: $K_1 = 6.99 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$, $\lambda = 50$ m, $Pc = 100000$ m para todas las mallas de la cuenca.

Solución

Se comparan las simulaciones realizadas con y sin represas a la salida de la cuenca.

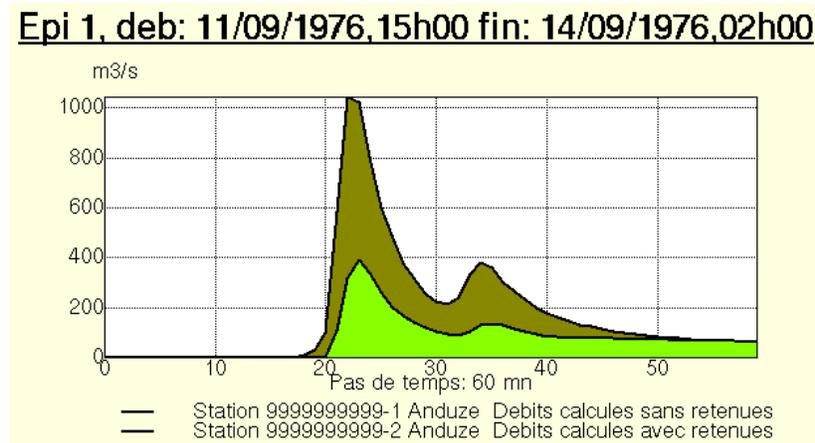


Figure 5-7 Caudales en Anduze con o sin represas

Se puede también representar los niveles en las presas durante el episodio. Las presas no han desbordado, ya que el nivel se quedó menor que 280 m.

Epi 2, deb: 11/09/1976,15h00 fin: 14/09/1976,02h00

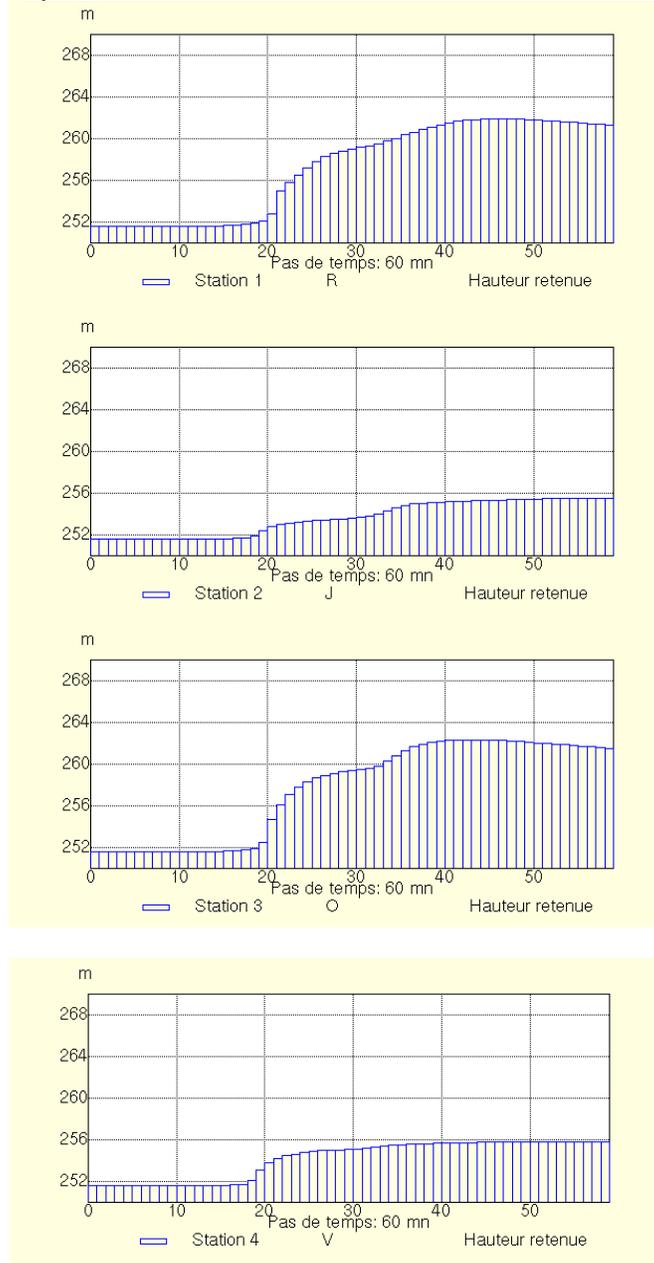


Figure 5-8

6. Aplicación del modelo de Green & Ampt (producción)

La función de producción Green & Ampt describe los procesos de infiltración del agua en el suelo, mediante hipótesis muy simplificadas caracterizadas por un frente húmedo muy marcado, una zona de transmisión cuyo contenido de agua es constante en el tiempo y en el espacio, y por un potencial matricial de presión aguas abajo del frente, igualmente constante en el tiempo y en el espacio. Esas aproximaciones se aplican de manera satisfactoria en casos de infiltración en suelos inicialmente secos, con textura gruesa. La expresión de infiltración es:

$$f(t) = K_s \left(\frac{\psi \cdot \Delta\theta}{F(t)} + 1 \right)$$

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \text{capacidad de infiltración (L/T)}$$

$F(t)$ = infiltración acumulada (L)

$\Delta\theta = \theta_s - \theta_i$ = diferencia entre humedad saturada y humedad inicial (adimensional)

K_s = conductividad hidráulica a saturación (L/T)

Ψ = potencial matricial al nivel del frente húmedo (L)

La ventaja de esta función se ubica en su base física, y en la posibilidad teórica de poder estimar los parámetros a priori, a partir de datos de los suelos o de mediciones “in situ”.

Este esquema fue integrado en MERCEDES, y completado por un tanque del suelo cuyo nivel describe la evolución del almacenamiento hídrico de manera continua. El tanque está alimentado por el agua que se infiltra, y se vacía por la evaporación, la percolación hacia la capa profunda y el flujo subsuperficial en las vertientes. El vaciado se calcula globalmente mediante el modelo del reservoir lineal. Un parámetro adicional representa la profundidad del suelo H_0 , lo que permite limitar la capacidad del tanque de suelo, y simular el escurrimiento por exceso de saturación del suelo.

El modelo comprende 5 parámetros iniciales: θ_i , θ_s , K_s , ψ , H_0 , y dos parámetros asociados al vaciado del tanque del suelo: w y ds .

θ_i , en cm^3/cm^3 = humedad volumétrica inicial del suelo. Los valores varían teóricamente entre 0 y θ_s

θ_s , en cm^3/cm^3 = humedad volumétrica del suelo saturado. Los valores varían teóricamente de 0 a 1 (en la práctica: de 0.3 a 0.7) según los suelos. Por ejemplo, la humedad a saturación es del orden de 0.3 – 0.4 para suelos arenosos, 0.4-0.5 para suelos de textura media, 0.5-0.6 para suelos arcillosos.

K_s , en mm/h = conductividad hidráulica de saturación. Estas conductividades pueden variar de manera considerable, de 10^5 a 10^{-6} mm/h. Se considera generalmente valores de 10^3 a 10^2 mm/h para suelos arenosos, de 10^2 a 10^{-1} mm/h para suelos arcillosos. Se puede también utilizar fórmulas como las de Kozeny-Karman o Allen Hazen, que relacionan la conductividad con el tamaño de las partículas, a pesar de que su eficacia parece muy limitada (Musy y Soutter, 1991).

Ψ , en mm = potencial matricial al nivel del frente húmedo. Los valores de este parámetro se ubican generalmente entre 100 y 1500 mm, y es difícil de determinar de manera precisa. Se encuentra en Handbook of Hydrology (5-15, 5-37) un método de estimación de este parámetro a partir de la fórmula de Brooks-Corey.

H_o , en mm = capacidad máxima de almacenamiento del suelo, expresado en columna de agua; Esa cantidad corresponde teóricamente al producto de la profundidad del suelo por su porosidad media.

w , adimensional = fracción del vaciado que participa en el escurrimiento, bajo forma de exfiltración. Este parámetro traduce el escurrimiento atrasado que proviene del vaciado de los perfiles superiores de los suelos, y debe ser calibrado sobre las avenidas observadas (en la parte de recesión).

ds , en días⁻¹ = coeficiente de vaciado exponencial del volumen infiltrado, simulando el vaciado del tanque de suelo (evaporación, percolación, escurrimiento hipodérmico). Un valor de 1 conduce a una tasa por día de vaciado de 63% (= $1 - \exp(-1)$), y una tasa por hora de vaciado de 4% (= $1 - \exp(-1/24)$). Los valores de ds están teóricamente comprendidos entre 0 (no hay vaciado) y ∞ (vaciado completo del depósito en cada intervalo de tiempo de cálculo). En la práctica, ds puede considerarse igual a la pendiente de la recesión de avenidas, en coordenadas logarítmicas.

El ejemplo presentado a continuación utiliza la opción de variabilidad espacial de los parámetros, malla por malla, basada en mapas que describen la variabilidad espacial del modelo: porosidad θ_s (archivo anduze.qsat), conductividad hidráulica K_s (anduze.Ksat), succión matricial ψ (anduze.psi), establecidos a partir de fórmulas de pedotransferencia:

Substrato	θ_s (cm ³ /cm ³)	K_s (mm/h)	ψ (mm)	H_o (mm)
Granitos	0.45	250	60	500
Esquistos	0.45	150	110	500
Calcáreos	0.45	50	210	500
Diversos	0.45	100	150	500

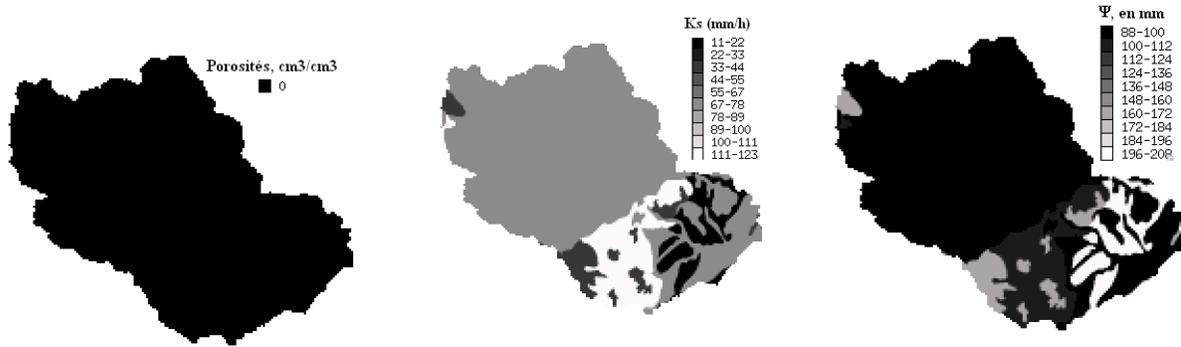


Figura 6.1

NB: las porosidades tienen valores 0.45, pero los decimales no se representan en Vicair por el momento.

El archivo asociado con cada uno de esos parámetros debe ser activado por el ícono  ubicado arriba de dichos parámetros. Este ícono abre una ventana que permite seleccionar el archivo mapa de referencia.

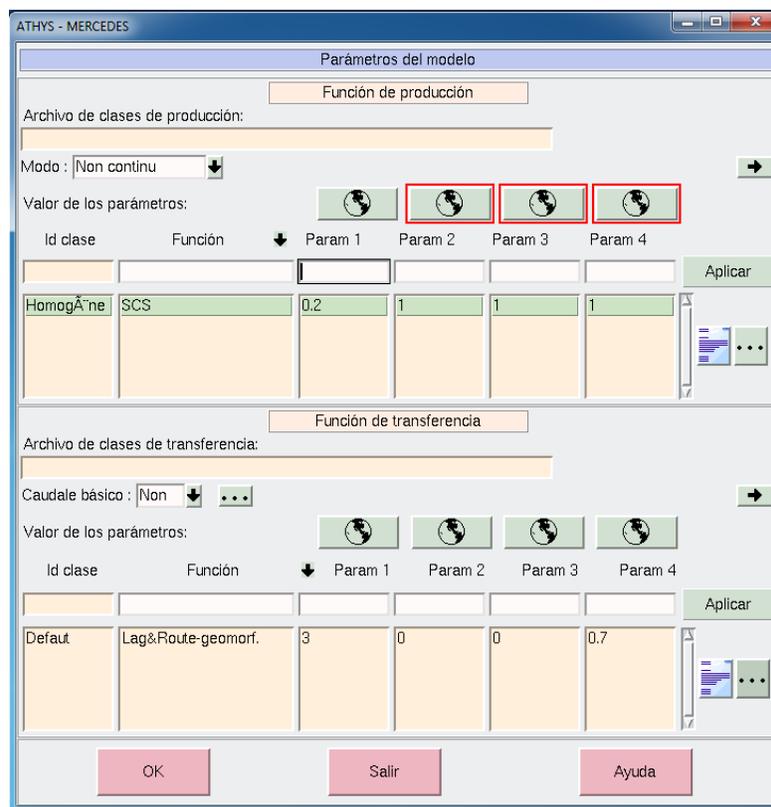


Figura 6.2

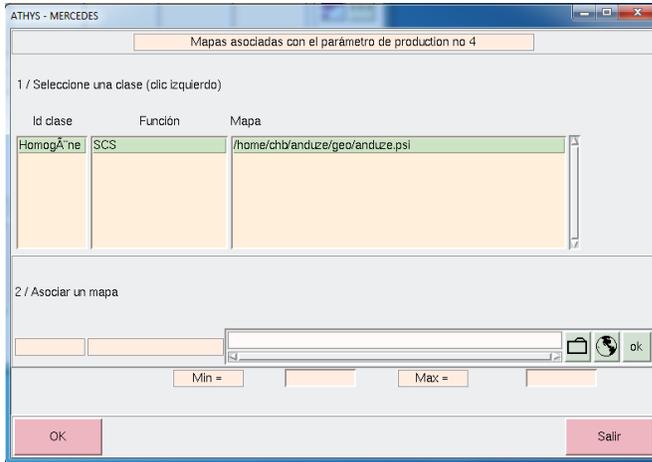


Figura 6.3



El ícono  señala que un parámetro está efectivamente asociado con un archivo, y que los valores del parámetro se leerán en este archivo. **NB: esos valores serán automáticamente multiplicados por el valor que aparece en la columna de dicho parámetro (en este caso 1), este valor es un coeficiente multiplicativo. Debe tenerse cuidado entonces en fijar un coeficiente igual a 1, si se quiere que el parámetro sea exactamente idéntico al valor leído en el mapa.** Este coeficiente multiplicativo puede ser optimizado, como todo parámetro (doble clic izquierdo sobre la casilla correspondiente).

Es posible combinar una variación espacial de un parámetro por clases de mallas (clases de producción o clases de transferencia) y una variación espacial por lectura en un archivo mapa. En este caso, los parámetros de cada clase de altitud se leerán directamente en el archivo asociado (el mismo para los clases), y se multiplicarán por los diferentes coeficientes asociados con cada clase.

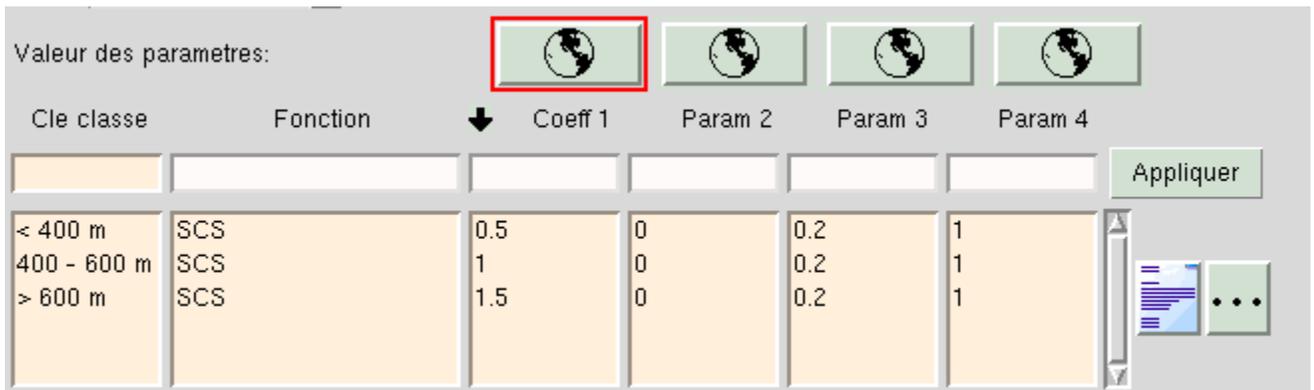


Figura 6.4

Para desactivar, borrar el nombre del archivo asociado en la ventana mostrada a continuación, y validar.

En el menú de parámetros, el ícono correspondiente ya no está encerrado en rojo. El parámetro se leerá entonces directamente en la columna (cuidando establecer el valor correcto, probablemente diferente del coeficiente multiplicativo utilizado anteriormente).

Ejercicio: calibrar el modelo sobre algunas avenidas del archivo base 28.txt. Se obtienen buenos resultados modificando el coeficiente multiplicativo de las conductividades hidráulicas, y fijando este coeficiente en 0.1. ¿Cómo interpretar este resultado? ¿Cuál es la sensibilidad del modelo a los otros parámetros?

7. Aplicación de Topmodel

TOPMODEL (Beven y Kirkby, 1979; Franchini et. al, 1996) es un conjunto de conceptos correspondientes a la producción de escurrimiento inducido al pie de las laderas por la saturación del perfil vertical del suelo (fig. 7.1). En TOPMODEL, el escurrimiento producido por la malla i en el tiempo t depende principalmente del déficit de saturación $\delta_i(t)$, que expresa el equivalente en agua necesaria para la saturación del perfil vertical del suelo al instante t : este tipo de funcionamiento es relativamente utilizado en zonas templadas, pero corresponde igualmente a algunos casos del mediterráneo (Bouvier et. al., 2006) o tropicales (Lelay et. al., 2007).

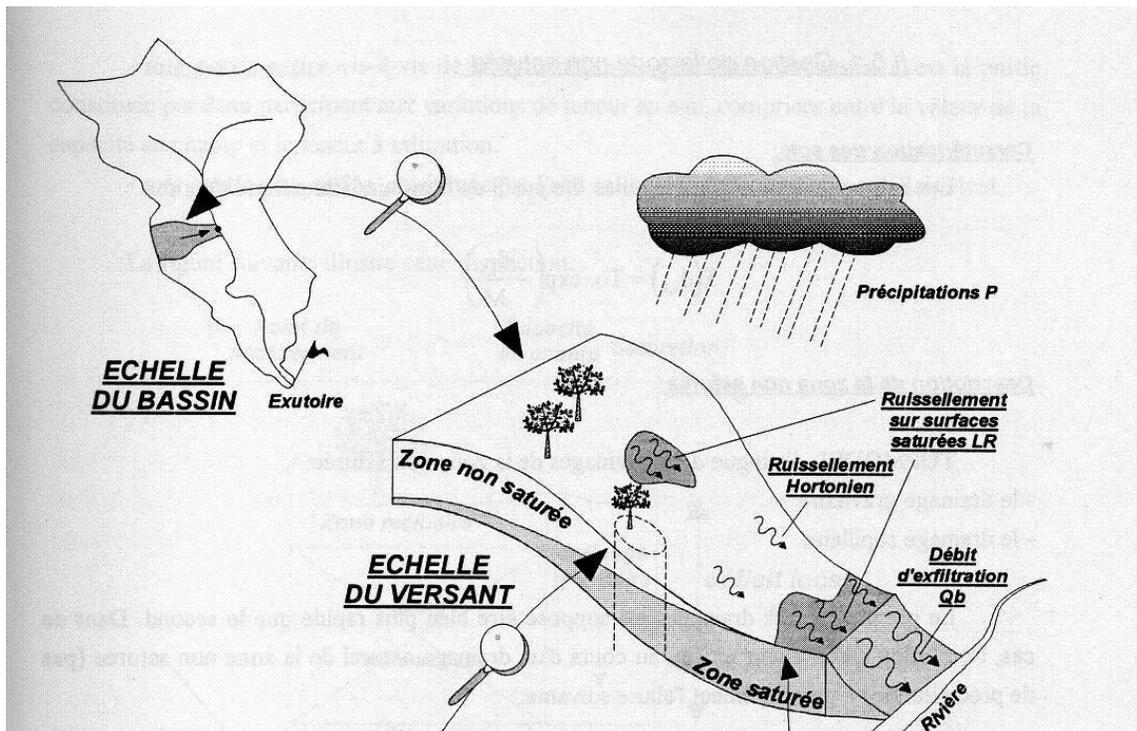


Fig. 7.1 Representación del déficit de saturación en una ladera (según Saulnier, 1996). El desarrollo de las zonas saturadas se debe a la infiltración local y a la existencia de flujo subsuperficial.

Topmodel se basa en 3 hipótesis principales:

- El perfil vertical de las conductividades hidráulicas de saturación de los suelos está dado por: $K(\delta) = K_0 \cdot \exp(-f \cdot \delta)$ en donde K_0 denota la conductividad hidráulica de saturación en superficie.
- El escurrimiento del nivel de agua es paralelo a la superficie.
- El régimen del escurrimiento sub-superficial es permanente.

En esas condiciones, se demuestra que el déficit de saturación de cada malla de la cuenca se escribe: $\delta_i(t) = \bar{\delta}(t) - \frac{\tau_i - \bar{\tau}}{f}$ en donde δ_i denota el deficit de agua sobre la malla i , $\bar{\delta}(t)$ el déficit medio de agua sobre la totalidad de la cuenca, τ_i se define, en el caso de un perfil exponencial de las conductividades hidráulicas, como $\tau_i = Ln(\frac{a_i}{tg\beta})$ en donde a_i es la superficie drenada aguas arriba de la malla, por unidad de contorno; y $tg\beta$ la tangente de la pendiente de la malla.

La malla es saturada si $\delta_i(t) < 0$, en este caso, el coeficiente de escurrimiento de la malla es igual a 1. En caso contrario, el coeficiente de escurrimiento de la malla es igual a 0.

Una de las ventajas de TopModel es poder ser inicializado “físicamente”. El déficit medio de la cuenca se inicia en función del caudal base observado al principio del episodio $Q_b(t_0)$:

$$\bar{\delta}(t_0) = -\frac{1}{f} Ln \left[\frac{Q_b(t_0)}{A \cdot T_0 \cdot \exp(-\bar{\tau})} \right]$$

A superficie de la cuenca, $T_0 = K_0/f$

Parámetros del modelo

En la versión con la cual trabajamos aquí, se consideran solamente 2 parámetros.

K_0 (m.h⁻¹): conductividad hidráulica de saturación en superficie. Los valores utilizados en TopModel son generalmente del orden de varias decenas de m/h.

f (m⁻¹): coeficiente de decrecimiento exponencial de la conductividad hidráulica de saturación en función de la profundidad.

Estos 2 parámetros son generalmente muy dependientes. Para el Gardon d’Anduze, se fija $K_0=3$ m.h⁻¹ y se procederá a la calibración del parámetro f .

Resultados

Se toman de nuevo los 28 eventos de la selección. La función de transferencia es la función Lag and Route, con $K_0 = 0.7$.

N°	Date	f (l/m)	Vo (m/s)	Qmax (m ³ /s)	Qb (m ³ /s)
2	15/10/1973	15.5	1.95	468.2	1.8
6	11/09/1976	9.2	2.06	1047.6	15.6
7	08/11/1976	10.2	2.18	986.7	18.6
9	19/10/1977	14.4	3.15	1159.6	0.4
12	07/12/1977	9.4	1.93	516.9	27
21	22/09/1994	7.8	2.1	663.5	9.7
22	19/10/1994	7.8	1.84	843.7	16.3
23	02/11/1994	6.6	2.06	666	34
27	18/09/1995	6.3	2.52	909	41
28	03/10/1995	7.7	1.62	1572	38
29	13/10/1995	9.6	1.76	1383	27
34	11/01/1996	3.3	1.27	553.5	155
37	20/01/1996	3.8	1.18	632	91
54	03/11/1997	12.1	1.97	805.5	4.5
56	16/12/1997	9.3	6.99	1139.4	10.6
58	15/04/1998	24	1.45	466.1	3.9
59	29/04/1998	14.9	1.17	480.8	19.2
65	17/05/1999	12.1	1.71	606.5	13.5
66	19/10/1999	5.5	2	622.6	37
70	28/09/2000	14.8	2.92	1186.6	3.4
79	09/10/2002	6.8	0.84	445	35
80	23/11/2002	6.9	1.67	605.4	103
81	09/12/2002	9.9	1.05	605	45
86	30/09/2003	9.1	1.43	510.7	9.3
87	15/11/2003	12.4	1.45	668.8	21.2
88	21/11/2003	10.3	1.75	1028.8	40
89	29/11/2003	8.2	1.82	1112.6	46
Med		9.9	1.99		
σ		4.3	1.13		
CV		0.4	0.56		

Tabla 7.1

8. Preparación de los datos

8.1. Preparación de los datos geográficos

Esta etapa consiste en la constitución de dos archivos imprescindibles:

- El archivo MDE (Modelo Digital de Elevaciones)
- El archivo de direcciones de drenaje

y de diferentes archivos opcionales destinados a la clasificación de las unidades de producción y de transferencia, o a ocultar una parte de la zona de estudio.

- El archivo de las clases de producción
- El archivo de las clases de transferencia
- El archivo mascara

Para el archivo MDE (como todos los archivos geográficos utilizados por ATHYS), diferentes formatos pueden ser reconocidos actualmente: GrassAscii o GrassBin (export SIG Grass), AsciiGrid (export Arcview o Mapinfo), Surfer Ascii. Existe en Vicair un convertidor que permite pasar de un formato a otro.



Figura 8.1

El archivo de direcciones de drenaje está formado a partir el archivo MDE, con ayuda de la función *Tratamiento del MDE / Archivos derivados del MDE*.



Figura 8.2

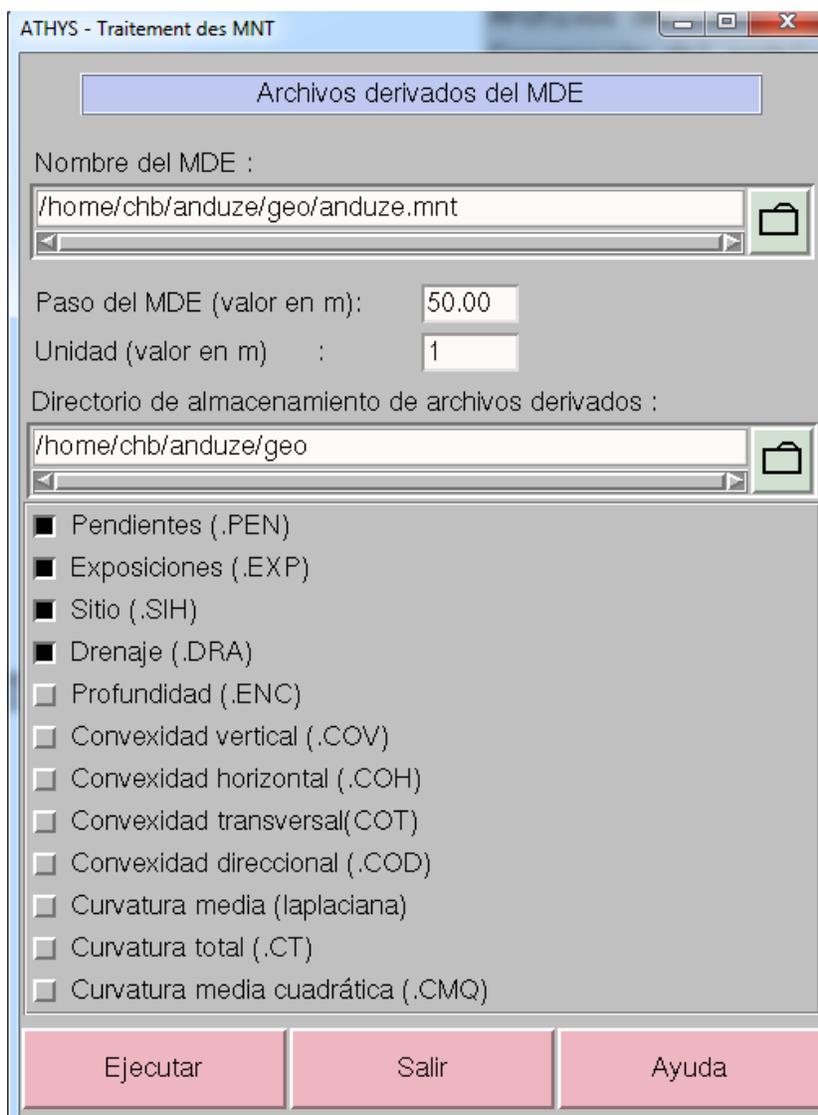


Figura 8.3

El archivo drenaje debe luego ser objeto de diferentes tratamientos, en particular eliminar las depresiones parásitas. Esta operación es automática, y realizada con la función *Corrección del modelo de drenaje/Detección y Corrección de depresiones*.

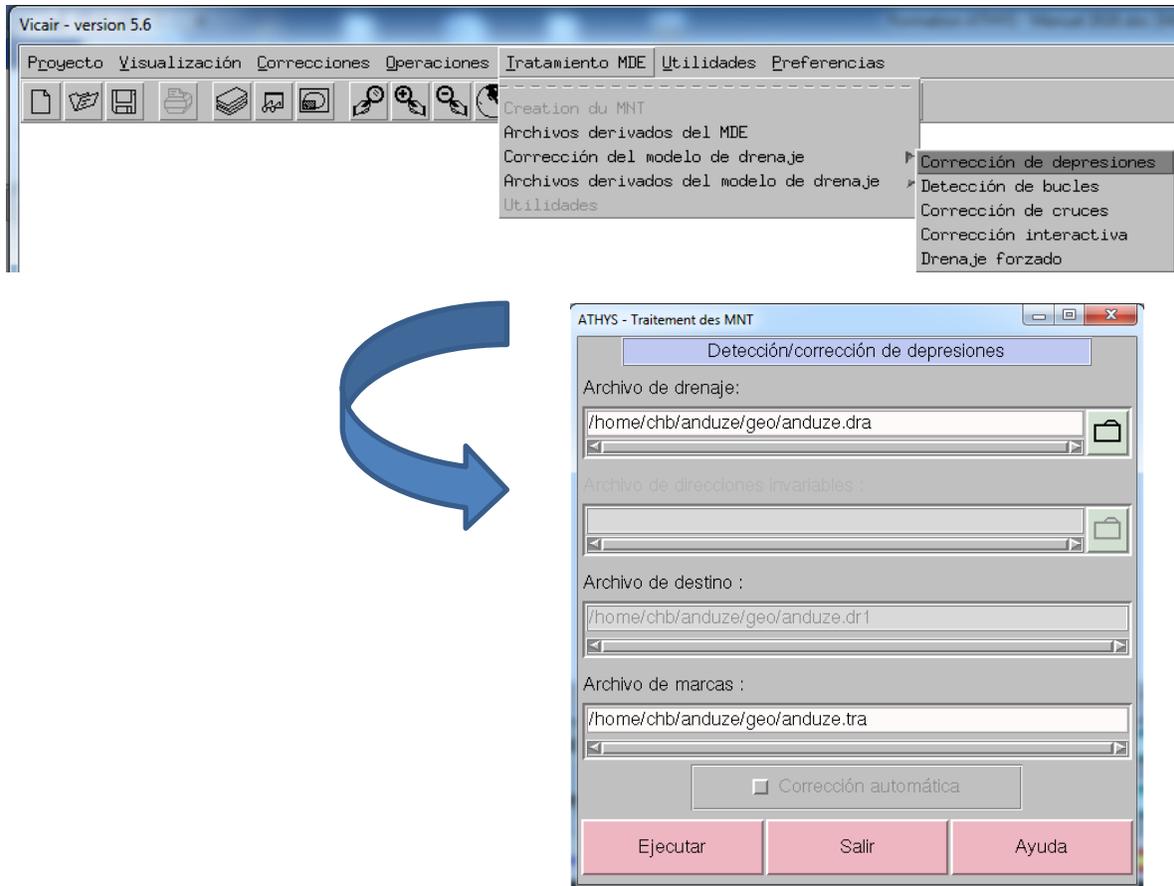


Figura 8.4

El primer campo corresponde al archivo de drenaje que se quiere corregir, aquí anduze.dra. Los otros campos se completan automáticamente:

El archivo *de destino* es un archivo de drenaje para el cual las depresiones han sido (en parte o totalmente) corregidas. Este archivo tiene sistemáticamente una extensión.dr1.

El archivo *trace* es una imagen en donde se proporciona la ubicación de todas las depresiones del modelo de drenaje tratado.

Al final del proceso aparece:

```

CORRECCION AUTOMATICA DEL MODELO DE DRENAJE
ARCHIVO      : /home/chb/anduze/geo/anduze.dra
              700 perfiles, 600 puntos

TRATAMIENTOS : 1874 depresiones iniciales
              0 Depresiones creadas por el metodo de eliminacion de bucles
              1078 correcciones de depresiones locales

todavia hay 794 depresiones

              METODO DE LOS EMPLEADOS
              73 correcciones locales

todavia hay 721 depresiones
              marcado de zonas exorreicas
              Tratamiento en curso .....

todavia hay 3 depresiones

Guardando el resultado en /home/chb/anduze/geo/anduze.dr1

Fin del tratamiento

```

Figura 8.5

Al final del proceso, quedan 3 depresiones. Se tiene entonces que realizar de nuevo el proceso, aplicado al archivo .dr1 (Se hará de nuevo este tratamiento tantas veces como sea necesario para eliminar totalmente las depresiones).

Después de que el archivo de drenaje haya sido corregido, dos archivos importantes pueden constituirse para controlar la calidad del modelo de drenaje:

- El archivo de las superficies drenadas, que representan la red hidrográfica
- El archivo de las cuencas, que determina las cuencas a partir de sus salidas

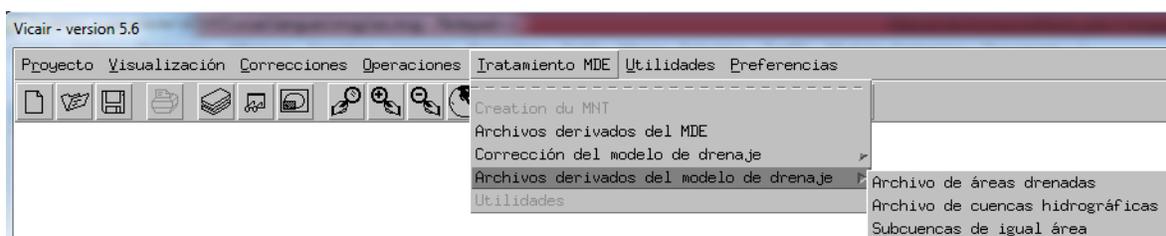


Figura 8.6

El archivo de las superficies drenadas indica para cada malla la superficie de la cuenca drenada por dicha malla (en número de mallas). Este archivo permite representar la red hidrográfica, por ejemplo, si se visualizan únicamente las mallas que drenan más de 100 mallas.

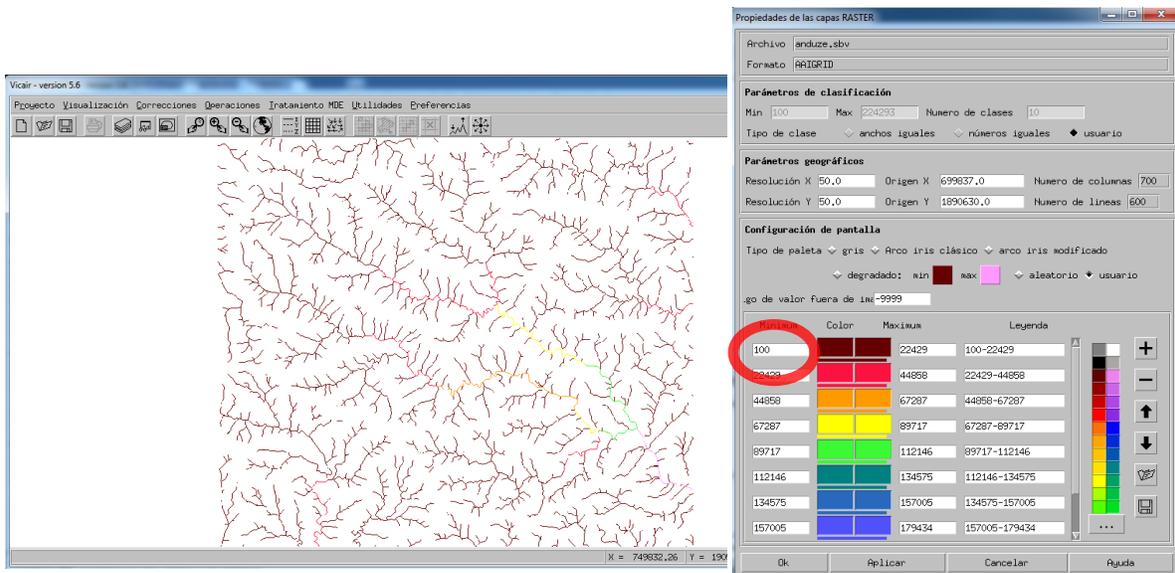


Figura 8.7

La visualización del archivo de las superficies drenadas permite comprobar que la red de ríos es realmente parecida a aquella establecida según los mapas topográficos disponibles.

La visualización del archivo de las cuencas vertedoras permite comparar el contorno de la cuenca obtenido del modelo de drenaje, con aquellos establecidos según los mapas topográficos disponibles. En caso de diferencia sensible, las direcciones de drenaje deben ser modificadas mediante la función *corrección interactiva* (se podrá utilizar como fondo del mapa el archivo de las superficies drenadas o el archivo de las cuencas vertedoras).

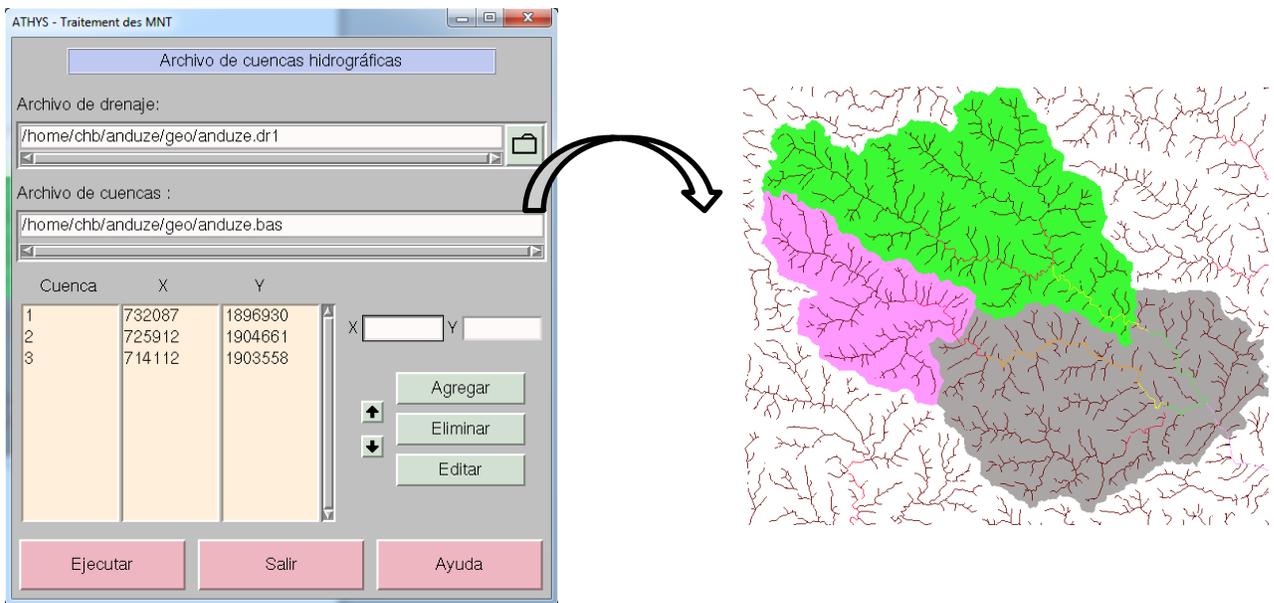


Figura 8.8

Los archivos opcionales pueden ser constituidos de diferentes maneras:

- Tratamiento de los MDE: los archivos derivados del MDE (pendientes, orientaciones, altitudes...) pueden en efecto ser utilizados para diferenciar clases de producción o de transferencia, o para ocultar una parte de la zona de estudio
- Combinación numérica de archivos: se combinará 2 atributos numéricos para formar un tercero, por ejemplo, el producto de la profundidad del suelo por la porosidad, para determinar la capacidad de almacenamiento hídrica de los suelos
- Combinación lógica de archivos: se combinará 2 caracteres cualitativos para formar un tercero, por ejemplo, una sub-clasificación obtenida a partir de una clasificación de pendientes y una clasificación de suelos: suelos profundos con fuerte pendiente, suelos poco profundos con fuerte pendiente, suelos poco profundos con poca pendiente, etc...

Ejercicio

Se quiere simular los caudales a las salidas de diferentes cuencas. Las coordenadas dadas son:

Mialet X = 725899 Y = 1904725 S ~ 230 km²

Saumane X = 714150 Y = 1903660 S ~ 100 km² No son muy precisas, y no permiten determinar las cuencas correspondientes, pues las mallas definidas por esas coordenadas se encuentran ligeramente al lado de los ríos reconstituidos por el modelo de drenaje.

- Declarar las coordenadas de las salidas de Mialet y Saumane en la lista de puntos de cálculo (menú 1 de Mercedes) y verificar que las cuencas vertedoras no están correctamente delimitadas
- Formar el archivo de las superficies drenadas, el cual figura la red reconstituida por el modelo de drenaje, y utilizar este archivo para determinar las coordenadas correctas de las salidas (se hará referencia antes al archivo .sbv)
- Lanzar las simulaciones y comparar los caudales obtenidos en Anduze, Mialet y Saumane

Indicación

Las coordenadas correctas de las estaciones son, por ejemplo:

Mialet X = 725959 Y = 1904652

Saumane X = 714074 Y = 1903636

8.2 Preparación de los datos hidro-pluviométricos

Los archivos de episodios pueden constituirse directamente dentro de Excel, después de exportar el archivo al formato TXT con tabulación. Una vez elaborados, los archivos TXT se pueden visualizar también y ser modificados en el módulo Vishyr, o procesados en el módulo Mercedes.

Importación de archivos Calamar/Panthere/antilope

La función es accesible en el módulo Vishyr, con la instrucción:

Fichier/Import-Export/Calamar-Panther -fts63

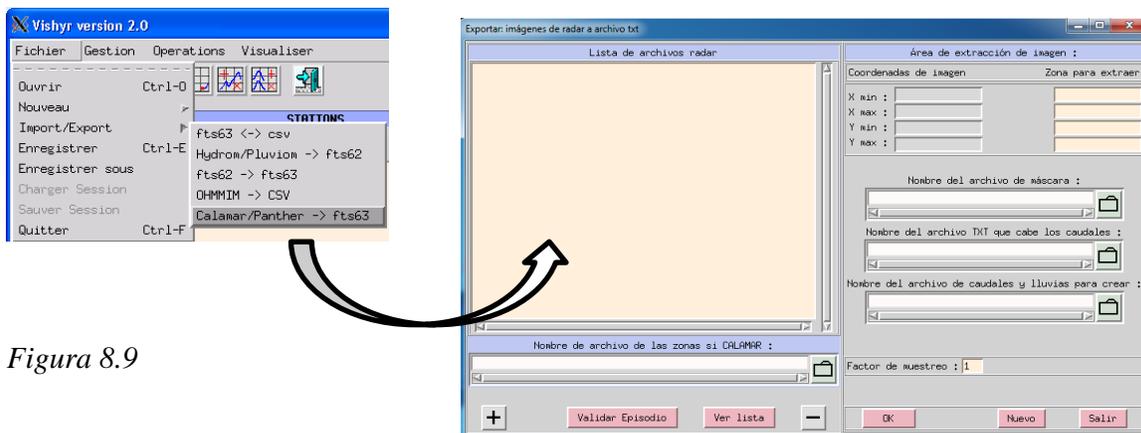


Figura 8.9

El radar mide la lluvia con intervalos de tiempo de 5 min, para un pixel de 1 km². Actualmente, los archivos de radar CALAMAR se tienen que convertir en archivo TXT (cada pixel radar se considera como un pluviógrafo ficticio).

Principios

- Los nombres de los archivos de radar deben ser de tipo AAAAMMJJHHmn.grd para los formatos Panthere/Antilope; xxZZ-aaaaMMjjhhmm.dat u otra extensión (o ZZ, por ejemplo 05, indica el número de zona Calamar, y xx representan dos caracteres cualesquiera) para los archivos Calamar
- Los archivos de radar deben ser agrupados por episodios: ícono \dagger . Un episodio corresponde a una lista de archivos de radar, seleccionados a partir del navegador. Las teclas de selección múltiple son shift y ctrl. El inicio del episodio corresponde a la primera fecha que aparece en los archivos de la lista, el final del episodio a la última fecha. Los archivos deben cubrir la misma zona. En caso de que faltara un archivo en la lista, las lluvias se interpolarán sobre intervalos de tiempo correspondientes.

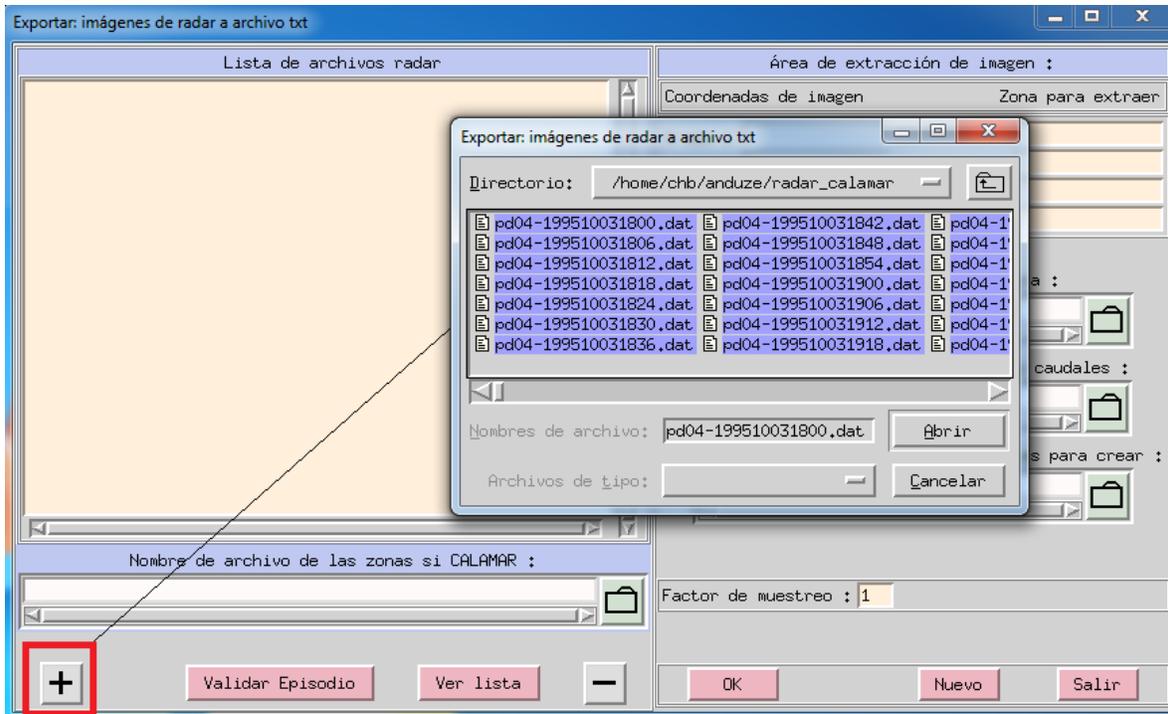


Figura 8.10

- En el caso de los archivos Calamar, no georeferenciados, el procedimiento es idéntico, pero hay que declarar con anterioridad el nombre de las zonas Calamar, a través de la definición de las coordenadas de cada zona. Esas coordenadas deben corresponder a la proyección geográfica que será utilizada posteriormente (una conversión de las coordenadas puede ser necesaria).

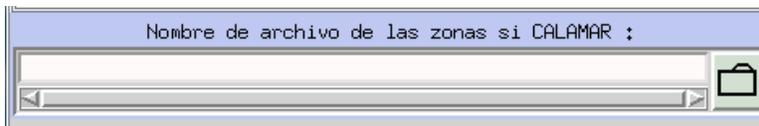


Figura 8.11

Ejemplo de archivo de zona Calamar

```

<?xml version="1.0" ?>
<defzones>
<zone num="01" xlambert="738.7" ylambert="3185.1" nbcol="50" nblig="50" pas="1"/>
<zone num="02" xlambert="705.7" ylambert="3195.1" nbcol="50" nblig="50" pas="1"/>
<zone num="03" xlambert="697.7" ylambert="3241.1" nbcol="64" nblig="64" pas="1"/>
<zone num="04" xlambert="742.7" ylambert="3232.1" nbcol="64" nblig="64" pas="1"/>
<zone num="05" xlambert="768.7" ylambert="3268.1" nbcol="64" nblig="64" pas="1"/>
<zone num="06" xlambert="797.7" ylambert="3257.1" nbcol="64" nblig="64" pas="1"/>
<zone num="07" xlambert="806.7" ylambert="3214.1" nbcol="64" nblig="64" pas="1"/>
<zone num="08" xlambert="713.7" ylambert="3283.1" nbcol="64" nblig="64" pas="1"/>
<zone num="09" xlambert="744.9" ylambert="3326.1" nbcol="64" nblig="64" pas="1"/>
</defzones>

```

- Una vez la lista ha sido constituida, el episodio debe ser validado. Se pasa a la conformación del episodio siguiente. Las coordenadas de la zona cubierta por el radar aparecen después de la validación del primer episodio.

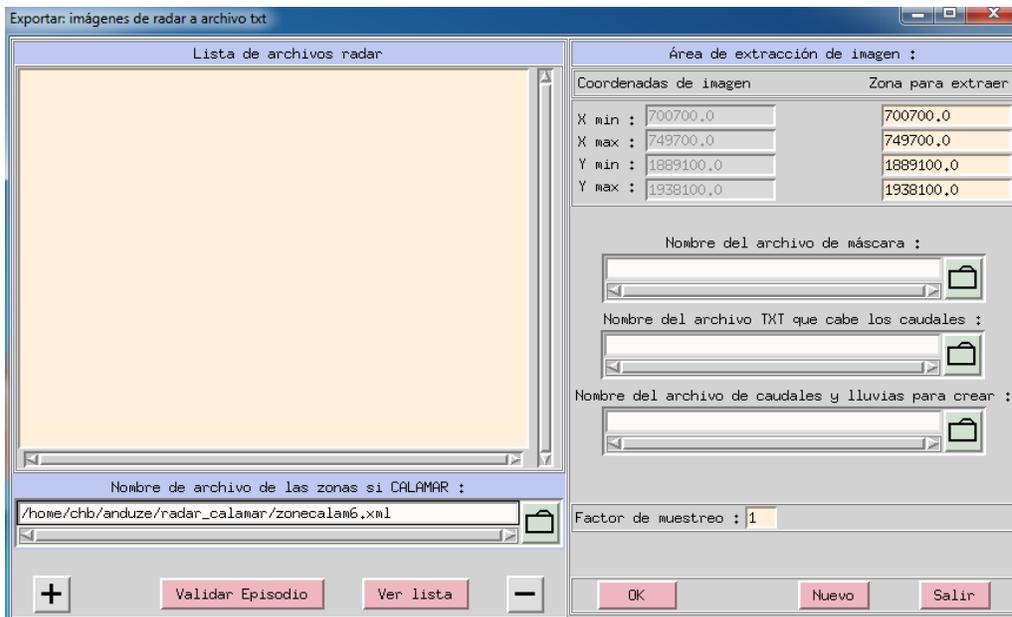
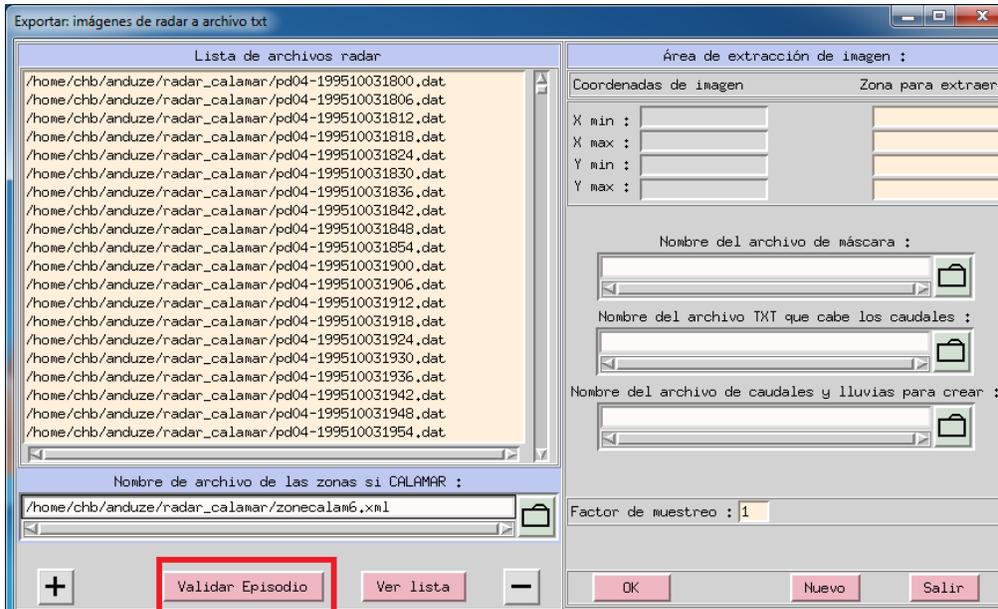


Figura 8.12

- Se accede a la lista de los episodios conformados para controlar y eventualmente suprimir un episodio.

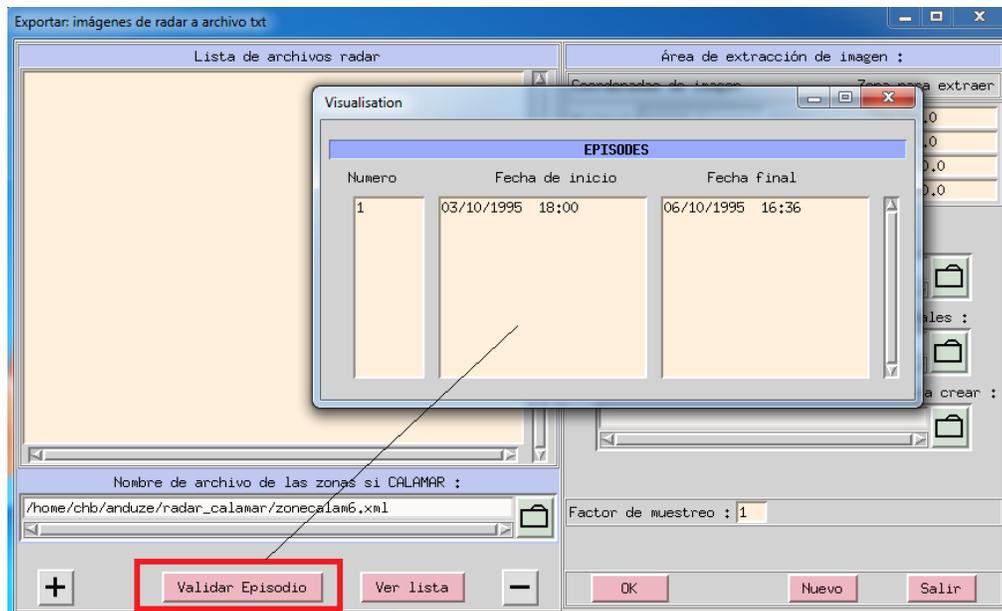


Figura 8.13

- Se escogen las opciones de importación:
 - Selección de pixel radar correspondiente a una sub-región, por coordenadas o utilización de una máscara, por ejemplo: cuenca, clase de altitudes... El archivo máscara puede ser en formato GridASCII, Grass, Surfer...
 - Nombre del archivo que cabe los caudales, si se tiene que fusionar los caudales con las lluvias del radar. Se completara el archivo de destino con los caudales para todas las fechas donde existen lluvias radar
 - Nombre del archivo de destino: archivo TXT constituido a partir de las lluvias de radar y eventualmente, de caudales si se especificó el archivo que cabe los caudales
 - Factor de selección de los pixeles de radar: selecciona 1 pixel sobre N en X y en Y.

- Se ejecuta el proceso de importación: OK. La tecla *Nuevo* permite reinicializar el procedimiento, y poner de nuevo en blanco las listas y los campos.

NB: los archivos TXT se construyen con el mismo intervalo de tiempo que aquel utilizado por los archivos de radar, generalmente 5 min. Este intervalo de tiempo puede ser modificado mediante la función: *Vishyr/Gestion/Modificar intervalo de tiempo*

9. Organización del programa y compilación

Puede ser necesario compilar nuevamente ATHYS o uno de sus componentes, si ha hecho una modificación en el código (Fortran o C). La compilación se realiza mediante la herramienta AcoTools, disponible en la pestaña ATHYS cuyas funciones o archivos se encuentran en el directorio.

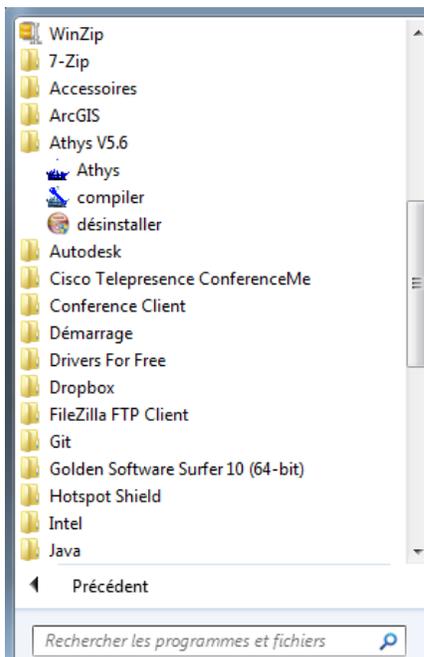


Figura 9.1

La instrucción *compiler* abre la ventana de compilación

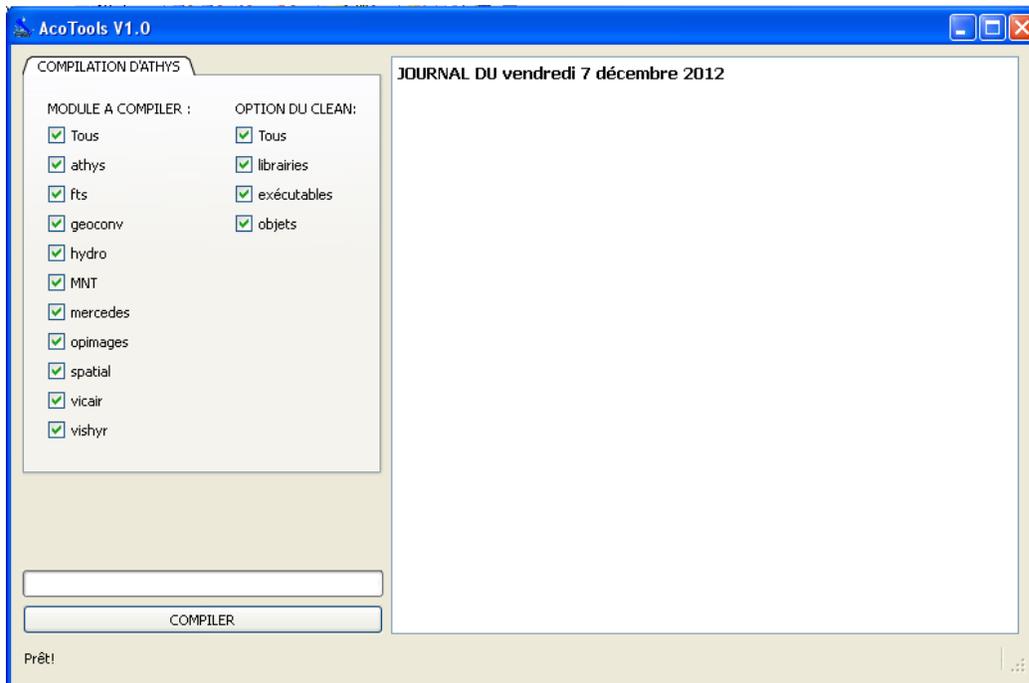


Figura 9.2

Es suficiente entonces seleccionar los módulos en los cuales se han realizado modificaciones y que deben ser compilados nuevamente. Hay que precisar también las opciones de "clean", es decir del tipo de módulos que deben ser suprimidos con anterioridad para poder activar la compilación. En la práctica, esa operación no es necesaria, salvo en los casos de modificaciones relativas a archivos que intervienen en "include".

10. Referencias bibliograficas

Gardon Anduze & Hydrología del Mediterráneo

Ayral, P.A. (2005) Contribution à la spatialisation du modèle opérationnel de prévision des crues éclair ALTHAÏR – Approches spatiale et expérimentale – Application au bassin versant du Gardon d'Anduze. *Thèse de Doctorat*, Université de Provence, Aix- Marseille I, 310 p.

Bouvier C., Ayral P.A., Brunet P., Crespy A., Marchandise A., Martin C. (2007). Recent advances in rainfall-runoff modelling: extrapolation to extreme floods in southern France. *Proceedings* . In. *Observing and modelling exceptional floods and rainfalls. Proceedings of the 1st International Workshop on Hydrological Extremes*, FRIEND-AMHY, Cosenza; Italy, 3-4 may 2006, 229-238.

Cosandey, C., Andréassian, V., Martin, C., Didon-Lescot, J-F., Lavabre, J., Folton, N., Mathys, N., Richard, D. (2005): The hydrological impact of the Mediterranean forest: a review of French research. *J. Hydrol.* 301, 235-249.

Dolciné, L., Andrieu, H., Sempere-Torres, D., Creutin, D. (2001): Flash flood forecasting with coupled precipitation model in mountainous Mediterranean basin. *J. Hydrol. Engng.* ASCE 6, 1-10.

Dominguez R., Bouvier C., Neppel L., Lubes H. (2005). Approche régionale pour l'estimation des distributions ponctuelles des pluies journalières dans le Languedoc-Roussillon. *Hydrological Sciences Journal*, 50(1), 17-29

Modelo SCS

Gaume E., Livet M., Desbordes M., Villeneuve J.P. (2004). Hydrological analysis of the river Aude, France, flash flood on 12 and 13 November 1999. *J. Hydrol.*, 286 (2004) 135–154

Lyon S.W., Gérard-Marcant P., Walter M.T., Steenhuis T.S. (2004). Using a topographic index to distribute variable source area runoff predicted with the SCS-Curve-Number equation. *Hydrological Processes*, 18(15), 2757-2771.

Mishra, S.K., Sahu, R.K., Eldho, T.I., Jain, M.K. (2006): An improved Ia-S relation incorporating antecedent moisture in SCS-CN methodology. *Water Resources Management* 30, 643-660.

NEH (1985): National Engineering Handbook section 4-Hydrology, U.S. Department of Agriculture, Washington, D.C.

Perrone, J., Madramootoo, C.A. (1998): Improved curve number selection for runoff prediction. *Can. J. Civ. Eng.* 25, 728-734.

Steenhuis T.S., Winchell M., Rossing J., Zollweg J.A., and Walter M.F. (1995). SCS Runoff Equation Revisited for Variable-Source Runoff Areas. *J. Irrig. and Drain. Engrg.* 121, 234 (1995)

Otros modelos

Berthet, L., Andréassian, V., Perrin, C., Javelle, P. (2009): How crucial is it to account for the Antecedent Moisture Conditions in flood forecasting? Comparison of event-based and continuous approaches on 178 catchments. *Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss.* 6, 1707-1736. 99

Cappelaere B., Vieux B., Peugeot C., Maia A., Seguis L. (2003). Hydrologic process simulation of a semiarid endoreic catchment in Sahelian West Niger. Model calibration and uncertainty characterization. *Journal of Hydrology*, 279 (1-4), 244-261

Chahinian, N., Moussa, R., Andrieux, P., and Voltz, M. (2005): Comparison of infiltration models to simulate flood events at the field scale. *J. Hydrol.* 306, 191–214.

Estupina Borrell V., Chorda J., Dartus D. (2005). Prévission des crues éclair. *Comptes Rendus Geosciences*, 337(13), 1109-1119

Franchini M., Wendling J., Obled C., Todini E. (1996). Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL. *J. Hydrol.*, 175, 293-338

Habets, F., Boone, A., Champeaux, J. L., Etchevers, P., Franchisteguy, L., Leblois, E., Ledoux, E., Le Moigne, P., Martin, E., Morel, S., Noilhan, J., Segui, P. Q., Rousset-Regimbeau, F., Viennot, P. (2008): The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France, *J. Geophys. Res.* 113, D06113, doi:10.1029/2007JD008548.

Perrin, C., Michel, C., Andréassian, V. (2003): Improvement of a parsimonious model for stream flow simulation. *J. Hydrol.* 279, 275-289.

Quintana Seguí, P., Martin, E., Habets, F., Noilhan, J. (2009): Improvement, calibration and validation of a distributed hydrological model over France. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 13, 163-181.

Saulnier G.M., Datin R. (2004). "Analytical solving of a bias in the TOPMODEL framework water balance", *Hydrological Processes*, 18(7), 1195-1218.

Humedad de los suelos

Aubert D., Loumagne C., Oudin L. (2003): Sequential assimilation of soil moisture and streamflow data in a conceptual rainfall–runoff model. *J. Hydrol.* 280, Issues 1-4, 145-161.

Brocca, L., Melone, F., Moramarcao, T. (2008): On the estimation of antecedent wetness conditions in rainfall-runoff modelling. *Hydrol.Processes* 22, 629-642.

Brocca, L., Melone, F., Moramarco, T., Singh, V.P. (2009b): Assimilation of observed soil moisture data in storm rainfall runoff modelling. *J. Hydrol. Engng.*, 14(2), 153-165.

Huang, M., Gallichand, J., Dong, C., Wang, Z., Shao, M., (2007): Use of soil moisture data and curve number method for estimating runoff in the Loess Plateau of China. *Hydrol. Processes* 21(11), 1471-1481.

Noilhan, J., Mahfouf, J, F. (1996). The ISBA land surface parameterisation scheme. *Global and Planetary Change*, vol.13, no.1-4, 145-159, Jun 1996

ATHYS

Arnaud P., Bouvier C., Cisneros L., Dominguez R. (2002). Influence of rainfall variability on flood prediction. *Journal of hydrology*, 260, 216-230

Bouvier, C., Delclaux, F. (1996): ATHYS: A Hydrological environment for spatial modelling and complig with a GIS. *Proceedings of the HydroGIS 96, Vienna, Austria*, pp. 19-28. AIHS publication no 235. 100

Bouvier C., Hingray B. (2001). Modélisation des flux inondants dans les voiries d'un secteur urbain de Ouagadougou (BF). *NOVATECH 2001 – 25-27 juin 2001 – Lyon(France)*, 1011-1014.

Christophe Bouvier, Anne Crespy, Agnes L'Aour-Dufour, François-Noel Crès, François Delclaux, Arthur Marchandise (2010). Modélisation hydrologique distribuée – Plate-forme ATHYS. *In. Traité d'Hydraulique Environnementale, volume 9 : Logiciels d'Ingénierie du cycle de l'eau, chapitre 7, 115-134*

Christophe Bouvier, Anne Crespy et Agnès Cres (2012). ANNEXE 10-3 : ATELIER HYDROLOGIQUE SPATIALISE ATHYS. *In. Hydrologie quantitative, Pierre-Alain Roche, Jacques Miquel et Eric Gaume*

Lhomme J., Bouvier C., Perrin J.L. (2004). Applying a GIS-based geomorphological routing model in urban catchment. *Journal of Hydrology*, 299, 203-216

Marchandise A. (2007). Caractérisation des processus de formation des crues éclair en région méditerranéenne. Application à la prévision de crues. *Thèse de l'Université Montpellier 2*.

Perrin J.L., Bouvier J.C., Janeau J.L., Ménez G., Cruz F. (2001), Rainfall-runoff processes in a small catchment in Andes mountains - The Rumihurcu Quebrada, Quito (Ecuador). *Hydrol. Proces.*, 15, 843-854

Métodos numéricos

Nash, J. E., Sutcliffe, J.V. (1970): River flow forecasting through conceptual models part I: A discussion of principles. *J. Hydrol.*, 10 (3), 282–290.

Rao, S.S. (1978): Optimization – Theory and applications. Wiley Eastern Limited, 747 p.