

Cálculo del tiempo de concentración en hidrología con GRASS.

Luis Miguel Barranco Sanz ⁽¹⁾, Javier Álvarez Rodríguez ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Centro de Estudios Hidrográficos (CEH), Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), Ministerio de Fomento, Paseo de la Virgen del Puerto 3, 28005 Madrid, luis.m.barranco@cedex.es; javier.alvarez@cedex.es

RESUMEN

Se presenta un programa desarrollado mediante GRASS 6.2 que permite calcular el tiempo de concentración en cuencas hidrográficas a partir del modelo digital de elevaciones. El hecho de que no haya ningún comando específico en GRASS que permita calcular el tiempo de concentración nos ha llevado a calcular éste a partir de aquellos comandos que aportan información hidrográfica, utilizando básicamente `r.watershed`. Además, se analizan los comandos GRASS que dan las direcciones de flujo, sus semejanzas, discrepancias y utilidades. Finalmente, se comparan los resultados obtenidos aplicando diferentes valores a la técnica de adaptación del modelo digital de elevaciones a partir de la información vectorial de la red hidrográfica existente.

Palabras clave: hidrología, tiempo de concentración, hidrografía, SIG, GRASS.

Abstract

A software developed in GRASS6.2 is presented, which allows to estimate the concentration time in watershed basins in a automatic way using the digital elevation model as an input data. There is not any specific command in GRASS for the concentration time so far and therefore we have to use other GRASS commands that provide hydrologic information, mainly `r.watershed`. Moreover, we analyse and compare the similarities and differences between those GRASS commands that give the flow directions.

Finally, we compare the results obtained using different values of burning-up, with the aim of fitting the digital elevation model to the river real digital dat.

Key words: hydrology, concentration time, hydrography, GIS, GRASS.

INTRODUCCIÓN

En hidrología, el tiempo de concentración se define como el tiempo que pasa desde el final de la lluvia neta hasta el final de la escorrentía directa. Representa el tiempo que tarda en llegar al aforo la última gota de lluvia que cae en el extremo más alejado de la cuenca y que circula por escorrentía directa. Por lo tanto, el tiempo de concentración sería el tiempo de equilibrio o duración necesaria para que con una intensidad de escorrentía constante se alcance el caudal máximo.

A partir de esa definición se comprende que el tiempo de concentración es de gran importancia en los estudios que se realizan sobre inundaciones.

Los modelos digitales de elevación (MDE) permiten obtener una valiosa información sobre parámetros hidrológicos (Olivera, 2001; web Felicísimo). Uno de los programas informáticos de difusión libre que se utiliza habitualmente en el Centro de Estudios Hidrográficos (CEH) es GRASS62. No obstante, dicho sistema de información geográfica no contiene un comando específico para el cálculo del tiempo de concentración. Si bien el tiempo de concentración se estima en el CEH utilizando diversos programas informáticos, se ha hecho ahora el intento de calcularlo exclusivamente mediante GRASS62. Para ello, se han utilizado otra serie de comandos de GRASS.

El comando *r.watershed* es el comando GRASS que aporta más información hidrográfica y ha sido en el que nos hemos basado para el cálculo del tiempo de concentración. El comando *r.watershed* crea, entre otros, 4 mapas ráster de utilidad para esta aplicación: el mapa de direcciones de drenaje, el mapa de acumulación, el mapa de líneas de flujo y el mapa de cuencas. El mapa de acumulación de drenaje asigna a cada píxel el número de píxeles aguas arriba ponderados según se indique en otro mapa (opción *flow*); en caso de que no se introduzca este último mapa, cada píxel estaría ponderado como 1 y el mapa de acumulación reflejaría la cuenca vertiente a cada píxel (expresado en número de píxeles).

Objetivos

El objetivo básico de este artículo es presentar una programación desarrollada en GRASS62 que permite calcular el tiempo de concentración en cualquier cuenca hidrográfica a partir del modelo digital de elevaciones.

Además, este artículo tiene otros dos objetivos añadidos: analizar los comandos GRASS que dan las direcciones de flujo y comparar los resultados obtenidos de aplicar diferentes valores a la técnica de adaptación del MDE a la red hidrográfica existente.

Zona objeto de estudio. Datos de entrada.

La zona objeto de estudio ha sido la cuenca del río Velillos, localizada en el sur de España, en la provincia de Granada. La cuenca ocupa una superficie de unos 2600 km².

El modelo digital de elevaciones utilizado es una malla cuadrada de 564 filas por 734 columnas, con celdas de 80 metros de lado. La altura máxima es 1700 metros y la mínima 400 metros.

Además, se disponía de dos capas vectoriales digitalizadas a partir del mapa topográfico 1:50.000, una con el contorno de la cuenca y otra con los dos principales ríos.

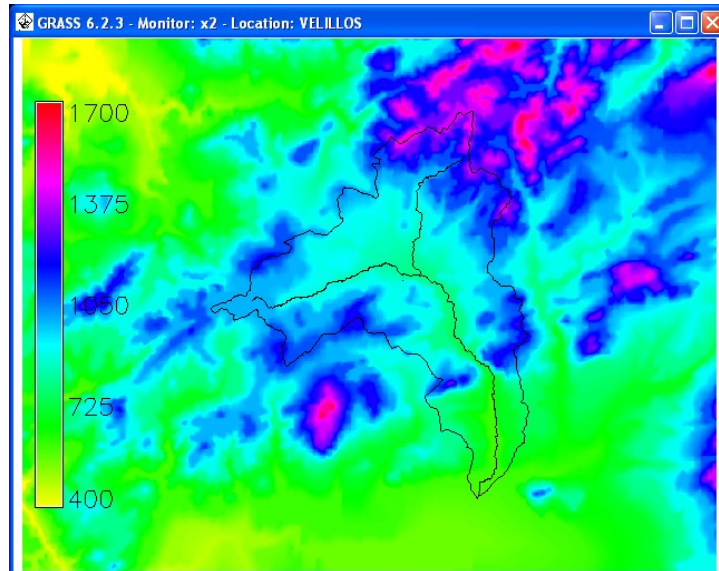


Figura 1. Capas GIS utilizadas de la cuenca del río Velillos: MDE y capas vectoriales del límite de cuenca y de los cauces principales..

Direcciones de flujo.

GRASS62 tiene 3 importantes comandos que estiman direcciones de drenaje: *r.watershed*, *r.drain* y *r.fill.dir*. Todos utilizan el clásico modelo D8, que implica asignarle a cada celda el código de aquella de las 8 celdas vecinas con la que tiene mayor pendiente positiva y a la que cederá el flujo. El primer comando, *r.watershed*, codifica del 1 al 8, con el 1 si la celda a la que vierte está al NE, 2 al N, y así cada 45° en sentido antihorario hasta el 8 si vierte hacia el E. Los otros dos comandos siguen el mismo esquema, pero multiplican los códigos anteriores por 45.

A pesar de que podría parecer que hay coherencia entre las direcciones, lo cierto es que los tres comandos utilizan algoritmos diferentes y por lo tanto producen diferentes mapas de direcciones de flujo. Los algoritmos utilizados son diferentes maneras de solucionar el problema habitual de asignar el drenaje en zonas llanas, donde hay pendientes idénticas en varias direcciones (Jenson et al, 1988).

Esas diferencias obligan a tener que tomar precauciones importantes cuando se trabaja de manera combinada con varios de esos comandos, ya que podrían dar resultados erróneos. Esa ha sido la razón fundamental por la que el cálculo del tiempo de concentración se ha basado en uno de ellos, el comando *r.watershed*, habiendo tenido que desechar el uso del que parecía más propicio en un principio, el comando *r.drain*.

En la figura 2 se puede ver la codificación de los comandos y cómo a un mismo píxel se le asignan dos direcciones de flujo diferentes, *r.fill.dir* hacia el oeste (180) y *r.watershed* hacia el suroeste (5).

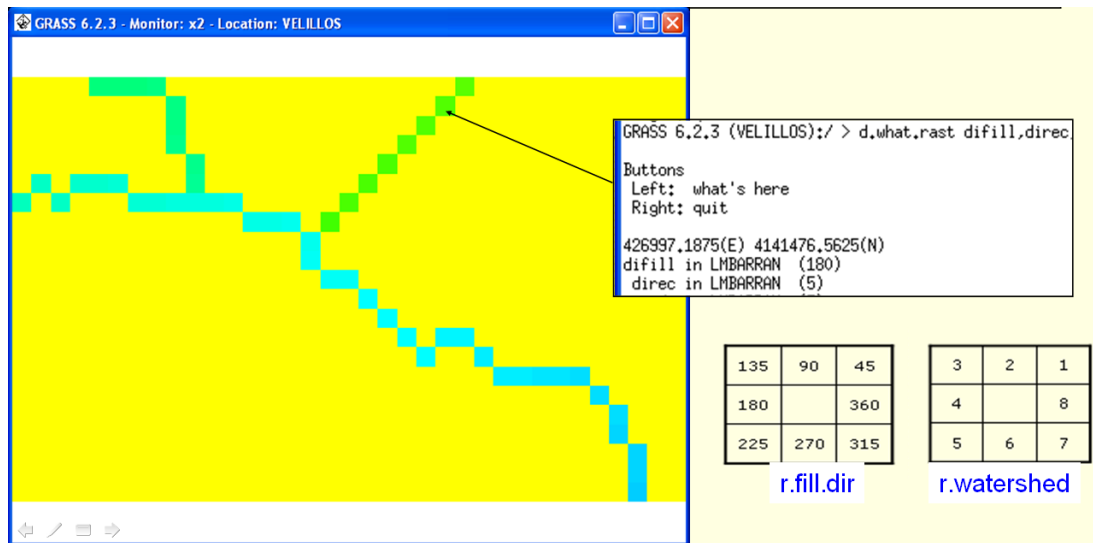


Figura 2. Mapa de direcciones de drenaje creado por `r.watershed`, con diferencias de direcciones asignadas a una celda.

Adaptación del modelo digital de elevaciones.

El comando `r.watershed` da la red de drenaje de manera automática a partir del MDE, asignando a cada píxel una dirección de flujo. No obstante, este proceso plantea dos principales obstáculos debido al proceso de discretización ligado a la resolución. El primero es que se pueden crear zonas endorreicas ficticias que conviene eliminar (`r.watershed` funciona con píxeles endorreicos, pero no otros comandos hidrológicos); el segundo es que la altura media de un píxel de 80 metros, como en nuestro caso de estudio, puede no reflejar angostos cañones de mucho menor espesor por lo que el proceso automático podría desplazar un cauce a otros píxeles vecinos de menor altura media, pero lejos del cauce real (Vogt et al, 2000).

El primero de los problemas se soluciona aplicando el comando `r.fill.dir` al MDE. El segundo de los problemas se solventa aplicando técnicas de "burning-in", en este caso, hemos rebajado la cota de los píxeles del MDE por donde se tiene la certeza de que pasan los cauces, lo que exige una previa rasterización de la capa vectorial de ríos (fig. 3). Este proceso modifica los datos digitales originales del MDE y puede tener consecuencias no deseadas, como luego se comentará.

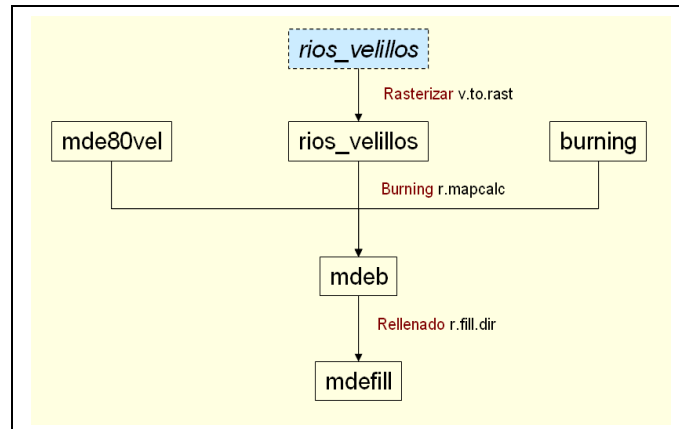


Figura 3. Adaptación del MDE.

Se ha elaborado un pequeño script para la adaptación del MDE:

OBTENER UN MDE MODIFICADO PARA TRABAJAR EN GRASS

```
# sh MDEc.sh MDE burning rios
```

```
MDE=$1
BUR=$2
RIOS=$3
```

1. Burning-in del ríos vectorial

```
v.to.rast input=$RIOS output=rios use=cat --o
r.mapcalc mdeb=$MDE-if"(isnull(rios),0,$BUR)"
```

2. Eliminar concavidades del MDE

```
r.fill.dir input=mdeb elevation=mdefill1 direction=difill --o
r.fill.dir input=mdefill1 elevation=mdefill2 direction=difill --o
r.fill.dir input=mdefill2 elevation=mdefill direction=difill --o
```

```
g.remove rast=mdef,mdefill1,mdefill2
```

Como se ve, el argumento "burning-in" permite al operador elegir cuánto se reduce la altitud de los píxeles por donde pasan los cauces reales (indicado por el argumento *rios*). Se ejecuta el comando `r.fill.dir` 3 veces consecutivas para eliminar totalmente las concavidades del MDE. En la figura 4 se muestra a la izquierda el mapa ráster donde se observan las diferencias entre la red hidrográfica vectorial obtenida por digitalización sobre mapa 1:50.000 (en negro) con la obtenida del MDE (en colores). A la derecha se ve cómo ambas coinciden a la perfección con un excesivo "burning-in" de 100 m. En el centro se observa la buena coincidencia entre ambas, especialmente en la zona de desagüe, con un "burning-in" de 10m. Para el cálculo del tiempo de concentración es esta zona, elegimos este último, de 10 metros, que si bien es grande, no altera de manera significativa los cálculos de los tiempos de concentración y ajusta bien los cauces que se obtienen con `r.watershed`.

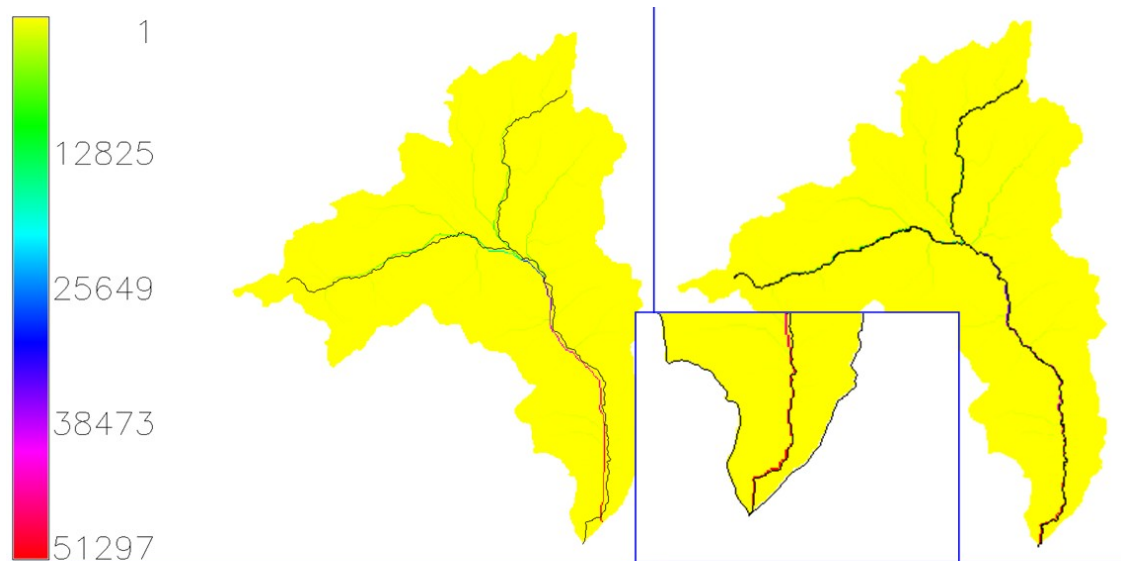


Figura 4. Ajuste de la red de drenaje aplicando diferentes valores de adaptación del MDE .

Cálculo del tiempo de concentración.

En el caso de cuencas en las que predomina el tiempo de recorrido del flujo canalizado por una red de cauces definidos, la Instrucción de Drenaje de la Dirección General de Carreteras de España (con las mismas variables que la fórmula de Kirpich o californiana) da la siguiente fórmula para el cálculo:

$$T_c = 0,3 \left(\frac{L}{J^{14}} \right)^{0,78} \quad [1]$$

donde:

Tc = tiempo de concentración (horas)

L = longitud del cauce (km)

J = pendiente media del cauce (m/m)

Se ha procedido a calcular esa fórmula para cada celda en la que está discretizada la cuenca objeto de estudio. Consecuentemente, se precisa obtener la distancia y el desnivel entre cada punto y el inicio del cauce que lo riega más lejano.

Para ello se ha elaborado un script en GRASS62, denominado *tc.sh*. Este script realiza los siguientes pasos:

- Obtener inicios de cauce.
- Correr r.watershed con flow cada inicio de cauce.
- Calcular la longitud.
- Calcular la pendiente.
- Calcular el tiempo de concentración.
- Comparar y tomar el valor máximo en cada píxel.

El script para la estimación del tiempo de concentración es el siguiente:

```
# CALCULAR EL TIEMPO DE CONCENTRACION sh tc.sh MDE MDEFill umbral
MASK

MDE=$1
MDEFILL=$2
UMB=$3
MASCARA=$4

# 1. Obtener cauces
r.watershed elev=$MDEFILL threshold=$UMB accum=ac drainage=dr basin=ba
stream=st --o
r.mapcalc acc=ac*$MASCARA

# 2. Obtener inicio de cauces
r.mapcalc st_1=if"(st>0,1,0)"
r.watershed elevation=$MDEFILL flow=st_1 accu=sta --o
r.mapcalc stac=abs'(sta)*$MASCARA
r.mapcalc ic=if"(stac==1,1,null())"
r.to.vect input=ic output=ic feature=point --o
v.out.ascii input=ic output=ic.txt

# 3. Obtener resolución MDE y cuantía saltos
g.region -p > regionaux.tmp
RES=`head -n 9 regionaux.tmp | tail -1 | awk '{print $2}'`
rm regionaux.tmp
r.mapcalc basd=if"(dr==1||dr==3||dr==5||dr==7,1.41,1.)"
r.mapcalc basdr=basd*$RES

# 4. Para cada inicio de cauce:
NPC=`wc -l < ic.txt`
echo $NPC
INDICE=1

while [ $INDICE -le $NPC ]; do
    echo $INDICE
    head -n $INDICE ic.txt | tail -1 > bas
    v.in.ascii input=bas x=1 y=2 output=bas1 --o
    v.to.rast input=bas1 output=bas1 use=cat --o
    r.mapcalc bas10=if"(isnull(bas1),0,bas1)"

# 5. Calcular longitudes
    r.watershed elev=$MDEFILL flow=bas10 accum=bas91 --o
    r.mapcalc bas92=abs'(bas91)*$MASCARA
    r.mapcalc bas93=bas92*basdr
    r.watershed elev=$MDEFILL flow=bas93 accum=bas94 --o
    r.mapcalc bas95=abs'(bas94)*$MASCARA
    r.mapcalc longitud_m=bas95-bas93
    r.mapcalc longitud=longitud_m/1000.0

# 6. Calcular pendientes.
    sed 's/|/ /g' bas > bas23
    r.what input=$MDE <bas23 >bas24
    sed 's/|/ /g' bas24 > bas25
```

```

awk '{print $4}' bas25 > bas26
VARIABLE=`head -n 1 bas26`
echo $VARIABLE
r.mapcalc difcota=-$MDE*bas92+$VARIABLE
r.mapcalc pendiente=difcota/longitud_m

# 7. Calcular tiempo conc. segun mayor tc(tc)
r.mapcalc bas27=exp'(pendiente,0.25)'
r.mapcalc bas28=0.3*exp'((longitud/bas27),0.78)'
r.mapcalc tcp=if'($MASCARA==1,0,null())'+if'(isnull(bas28),0,bas28)"

if [ $INDICE == 1 ]
then
    r.mapcalc tc=tcp
else
    r.mapcalc bas30=max'(tcp,tc)'
    r.mapcalc tc=bas30
fi
INDICE=`expr $INDICE + 1`
done

g.remove rast=ac,dr,ba,st,acc,st_1,sta,stac,ic,basd,basdr,bas1,bas10
g.remove rast=bas91,bas92,bas93,bas94,bas95, longitud_m,longitud
g.remove rast=difcota,pendiente,bas27,bas28,tcp,bas30
g.remove vect=ic,bas1
rm bas ic.txt bas23 bas24 bas25 bas26

```

El script no calcula para cada píxel cuál es el origen de cauce más lejano, sino cuál es el origen de cauce con mayor tiempo de recorrido, lo que consideramos más coherente con las aplicaciones del tiempo de concentración.

Los cauces se crean con el comando `r.watershed`, utilizando un umbral de número de celdas vertientes mínimo para que empiece el cauce. Dicho comando crea mapas de valores de acumulación de drenaje y asigna valores negativos a píxeles que probablemente reciban escorrentía superficial de fuera de la región de estudio; por lo tanto, calcula los valores para píxeles fuera de máscara, aunque no los dibuje. Para eliminar los datos fuera de máscara, conviene multiplicar el mapa de acumulación de drenaje por la máscara.

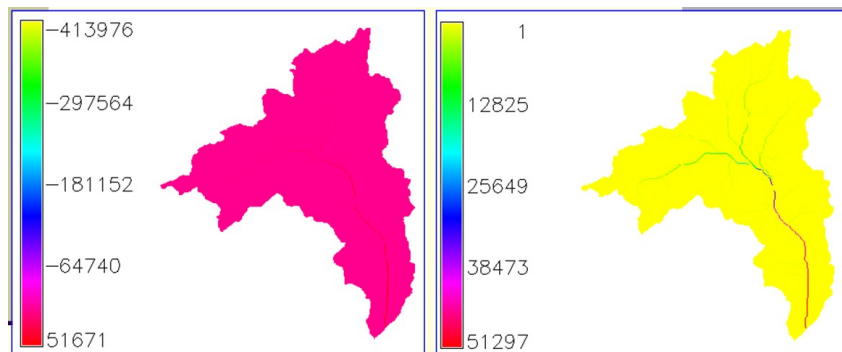


Figura 5. El comando `r.watershed` calcula fuera de la máscara.

Los inicios de cauce se calculan mediante la opción *flow* de *r.watershed*, mapa de ponderación el mapa de cauces a los que se les ha asignado el valor 1.

Posteriormente, se calcula, para cada celda de inicio de cauce, la longitud entre dicha celda y el resto de las definidas aguas abajo. Esas longitudes se obtienen a partir del mapa de acumulación del drenaje que calcula *r.watershed* con la opción *flow*, que determina los saltos de celda, que son a su vez transformados en distancias a partir de la información sobre la resolución del MDE.

A continuación se calcula la diferencia de cota entre la celda de inicio de cauce y las de aguas abajo, que luego se transforma en pendientes. En este paso es donde más puede haber influido el valor del “burning-in” escogido. En la figura 6 se ve un ejemplo generado con una reducción de 100 m, que afectaría a los píxeles por donde van los cauces principales, pero no a otros pequeños cauces definidos automáticamente con *r.watershed* y umbral de 781 píxeles. Se produce la incoherencia de que hay píxeles que están 39 metros más altos que el píxel donde hay un inicio de cauce que le envía escorrentía, con el consiguiente error en la pendiente y tiempo de concentración.

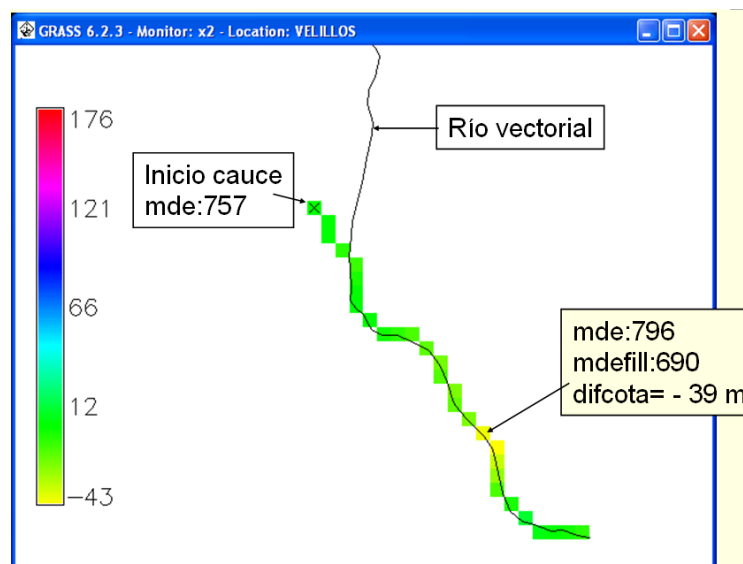


Figura 6. MDE con burning-in de 100m.

Una vez tenidos todos los datos, se calcula el valor del tiempo de concentración para cada inicio de cauce según la fórmula [1].

Finalmente, se comparan los tiempos de concentración obtenidos en cada píxel para todos los inicios de cauce y se adopta el mayor valor en cada píxel, obteniéndose como resultado final el mapa ráster de tiempos de concentración en horas.

El tiempo de concentración depende del umbral de cuenca vertiente elegido (opción *threshold* de *r.watershed*), ya que condiciona el número de inicios de cauce. El script está preparado para calcular el tiempo de concentración con diferentes umbrales, incluso tan pequeños como de hasta de 1 celda; aunque, en este caso, el tiempo de computación se incrementa considerablemente.

Por consiguiente, es importante elegir un valor razonable para dicho umbral. En la figura 7 se muestra el mapa resultante para un umbral de 781 celdas, que corresponde con una cuenca vertiente de 5 km². Ese umbral da buenos resultados, es coherente con la realidad y apenas precisó de 4 minutos de computación en un ordenador personal. Umbrales mucho menores suponían ligeras variaciones de los resultados no significativas.

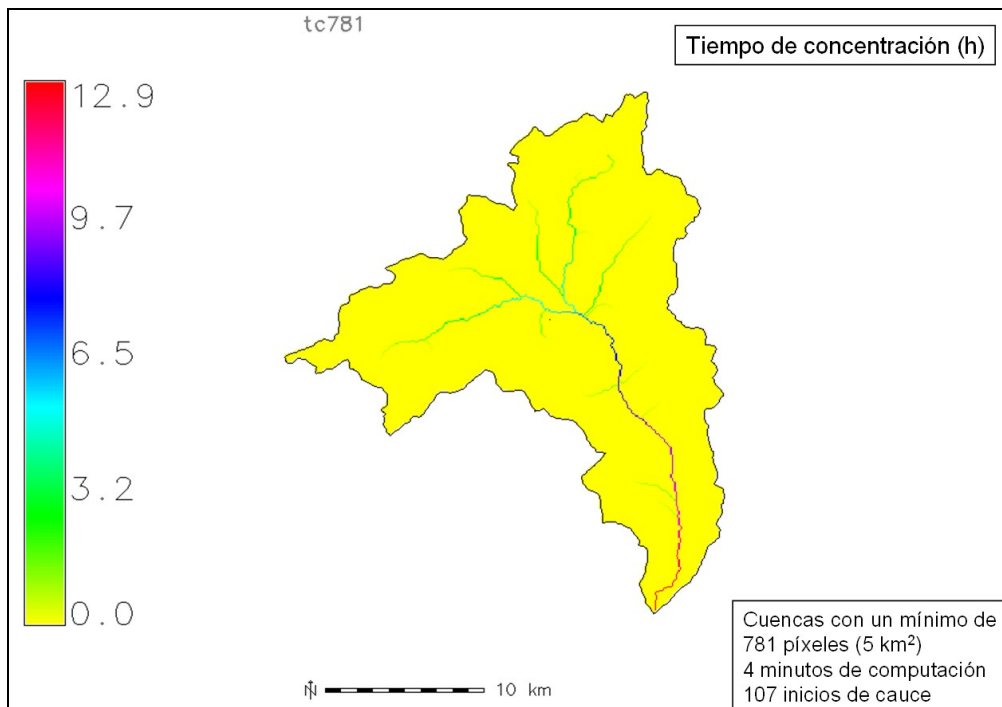


Figura 7. Tiempo de concentración a partir de cuenca vertiente de 5 km².

Uno de los aspectos que hay que tener muy en cuenta es la influencia que puede tener la máscara en los resultados finales. Así, las direcciones obtenidas por *r.watershed* pueden ser diferentes según la máscara que esté activa, ya que causa variaciones en zonas llanas, donde la dirección asignada dependerá de los píxeles vecinos. En el ejemplo de la figura 8 se ve cómo la utilización de una máscara coincidente con una subcuenca da diferencias importantes con relación a las que se obtendrían sin esa máscara.

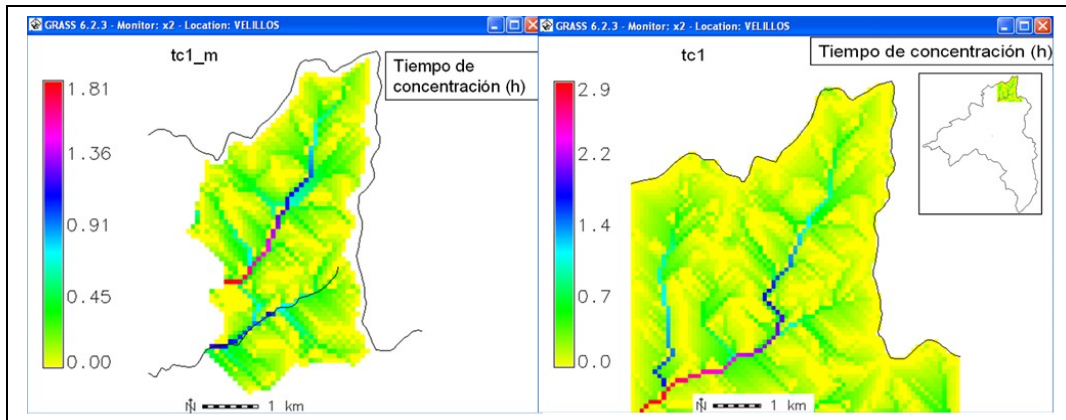


Figura 8. Tiempo de concentración para todos los píxeles utilizando como máscara una subcuena (izquierda) o toda la cuena (derecha).

CONCLUSIONES

La característica de software libre del SIG GRASS permite disponer de diferentes comandos que aportan información muy valiosa sobre parámetros hidrológicos. No obstante, no hay comandos específicos que permitan obtener otros parámetros hidrológicos, también de validez, tales como el tiempo de concentración en cuencas hidrográficas. Además, la característica de software libre hace que algunos de esos comandos puedan dar diferentes resultados.

Se ha elaborado un programa en GRASS62 (script) que permite calcular el tiempo de concentración en cuencas hidrográficas. Se ha basado en comandos GRASS previamente existentes, fundamentalmente *r.watershed*. Previamente a su utilización, es necesario conocer las características del programa, básicamente acerca del umbral a partir del cual se empiezan a delimitar los cauces y acerca del papel que juega la máscara.

REFERENCIAS

- ◆ Felicísimo, A.M. <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli/CursoMDT/CursoMDT.html>
- ◆ Instrucción de Carreteras 5.2-IC. "Drenaje Superficial". Orden 14 mayo 1990. BOE núm. 123 (23 mayo 1990).
- ◆ Jenson, S.K. & Domingue, J.O. (1988).- Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54 (11): 1593-1600.
- ◆ Manuales grass. http://grass.itc.it/grass62/manuals/html62_user/
- ◆ Olivera, F. (2001).- Extracting hydrologic information from spatial data for HMS modelling. *Journal of Hydrologic Engineering*: 524-530.
- ◆ Vogt, J. y Folving, S. (2000).- Deriving drainage networks and catchment boundaries at the European scale. Ed.: European Commission-JRC. 56 pp.