



EXTRACCIÓN AUTOMATIZADA DE LA RED DE DRENAJE A PARTIR DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIONES

Automated extraction of drainage networks from digital elevation models

S. Saura⁽¹⁾, A. Gómez-Plaza⁽²⁾ y V. M. Castillo⁽²⁾

(1) *Dasometría. Departamento de Economía y Gestión de las Explotaciones e Industrias Forestales. E.T.S. Ingenieros de Montes (Universidad Politécnica de Madrid). Ciudad Universitaria s/n.*

28040 Madrid. E-mail: santisaura@montes.upm.es. Fax: 91 5439557

(2) *Departamento de Conservación de Suelos y Aguas. CEBAS-CSIC.*

Aptdo. correos 4195. 30080 Murcia

Resumen: Se aborda la utilización de Modelos Digitales de Elevaciones matriciales para la extracción automática de la red de drenaje en tres cuencas experimentales mediante la aplicación de algoritmos sencillos de modelización del flujo de escorrentía por la superficie de la cuencas. Estos algoritmos están basados en las hipótesis de que el movimiento superficial del agua está controlado por la topografía y de que la escorrentía se genera uniformemente por toda la cuenca. Previamente es necesario asegurar la conectividad hidrológica del MDE, lo que en este caso se resuelve mediante la aplicación de filtros de media locales en las zonas en las que la dirección de flujo no está definida inicialmente. Se propone un nuevo método de validación interna de los resultados del modelo que permite determinar el nivel de detalle acerca de la red de drenaje que es alcanzable con estos procedimientos y se concluye que la red de drenaje obtenida es, en el rango de escalas correspondiente, coincidente con las observaciones de campo realizadas en las cuencas respectivas, con las ventajas de mayor precisión y menor coste frente a los métodos manuales tradicionalmente utilizados en la delineación de la red de drenaje.

Palabras Clave: *Modelos Digitales de Elevaciones, red de drenaje, escorrentía, geomorfología, modelización hidrológica, Sistemas de Información Geográfica.*

Abstract: The use of grid-based Digital Elevation Models for the automated extraction of drainage networks in three experimental watersheds is presented. Simple algorithms are applied to simulate water flow over basin's surface, based on the assumptions that water runoff is controlled by gravitational forces and is homogeneously generated throughout the basin. For these purposes, it is first necessary to ensure the hydrological connectivity of the DEM, what is solved in this study by the application of local mean filters in those cells where flow direction is not defined. A new internal validation method for the determination of the range of scales over which the results of the analysis are really correspondent to the basin's geomorphology is proposed. The obtained results are found to be, in the appropriate range of scales, coincident with field observations, and with the advantages of higher precision and lower costs than manual procedures commonly used for drainage network delineation.

Keywords: *Digital Elevation Models, drainage networks, water runoff, geomorphology, hydrological modeling, Geographic Information Systems.*



Saura, S.; Gómez Plaza, A. y Castillo, V. M. (2000). Extracción automatizada de la red de drenaje a partir de modelos digitales de elevaciones. *Rev. C. & G.*, 14 (3-4), 25-37. © SEG, AEQUA, GEOFORMA Ediciones

1. Introducción

La creciente disponibilidad de información espacial, junto con el gran desarrollo en los últimos años de los equipos informáticos y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), han multiplicado las posibilidades que investigadores y gestores tienen de manejar y analizar la información espacial.

Estas nuevas posibilidades hacen que los métodos clásicos de afrontar problemas de modelización de fenómenos físicos y ecológicos estén siendo sustituidos, o al menos complementados, por enfoques que incorporan de manera explícita el componente espacial de los sistemas estudiados y que, aprovechando la capacidad de cálculo de los equipos informáticos, aplican métodos cuantitativos que anteriormente no eran abordables por el gran volumen computacional requerido por los mismos.

Así, en el ámbito de los modelos hidrológicos se tiende con claridad a un nuevo enfoque en el que la prioridad se centra en la descripción de la variabilidad espacial del territorio o sistemas estudiados de manera que, a partir de la misma, se puedan plantear modelos capaces de aprovechar dicha información espacial. Se trata en definitiva de una nueva aproximación en la modelización hidrológica.

En concreto, tareas que tradicionalmente se venían realizando manualmente en el ámbito de la hidrología, como la delimitación de la red de drenaje o la delimitación de cuencas hidrológicas, están siendo sustituidas por métodos que utilizan la información disponible en los Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) y que, mediante el uso de algoritmos sencillos, permiten obtener resultados más potentes y precisos, y con una clara reducción de los costes tradicionalmente asociados a estos procesos (Felicísimo, 1994).

En este artículo se exponen los métodos aplicados para la obtención automática de la red de drenaje a partir de los Modelos Digitales de Elevaciones correspondientes a tres cuencas experimentales situadas en el término municipal de Cieza (Murcia). Estas cuencas forman parte de la Red de Estaciones Experimentales de Seguimiento y Evaluación de la Erosión del proyecto LUCDEME, financiada por la Dirección General de Conservación de la Naturaleza del Ministerio de Medio Ambiente.

2. Material y métodos

2.1. Descripción de las cuencas y del MDE

El área de estudio se encuentra enclavada en el piedemonte de la Sierra del Picacho, en el término municipal de Cieza (Murcia). Geomorfológicamente se trata de un glacis encostrado sobre rocas carbonatadas. Los suelos predominantes son de tipo Xerosol Petrocálcico. La zona se encuadra en el piso bioclimático Mediterráneo inferior semiárido con una precipitación media de 283 mm. anuales. En Julio de 1994 un incendio forestal asoló la zona, por lo que, en la actualidad, se pueden distinguir tres formaciones vegetales predominantes: una zona quemada en la que se está regenerando un matorral de esparto (*Stipa tenacissima*), una zona de espartal bien desarrollado, no afectado por el incendio, y una zona de pinar claro (densidad de cubierta arbórea inferior al 20%) con sotobosque mediterráneo esclerófilo.

Las tres cuencas estudiadas fueron seleccionadas de la siguiente manera: dos en la zona quemada de 7.9 y 6.4 has respectivamente (C1 y C2), con orientaciones sur y este, y una tercera (C3) en la zona sin quemar con una superficie de 24.2 has y con diferentes orientaciones (Figura 1). En la Tabla 1 se recogen las principales características de las tres cuencas.

A partir de un mapa topográfico de la zona a escala 1:5000 se digitalizaron, mediante el programa informático *Autocad*, las curvas de nivel correspondientes, obteniéndose así el Modelo Digital de Elevaciones de las cuencas, que consiste en una descripción numérica en formato digital de su distribución de altitudes (Doyle, 1978; Burrough, 1986).

Tabla 1. Principales características de las cuencas estudiadas.
Table 1. Main characteristics of the studied watersheds.

Variable	C1	C2	C3
Area (ha)	7.86	6.38	24.28
Longitud máx. (m)	397.4	366.8	653.6
Perímetro (m)	1081	973	2280
Pendiente (%)	32.6	26.8	30.6
Cota máxima (m)	487	480	586
Cota mínima (m)	420	422	484
Orientación	Sur	Este	Sudeste

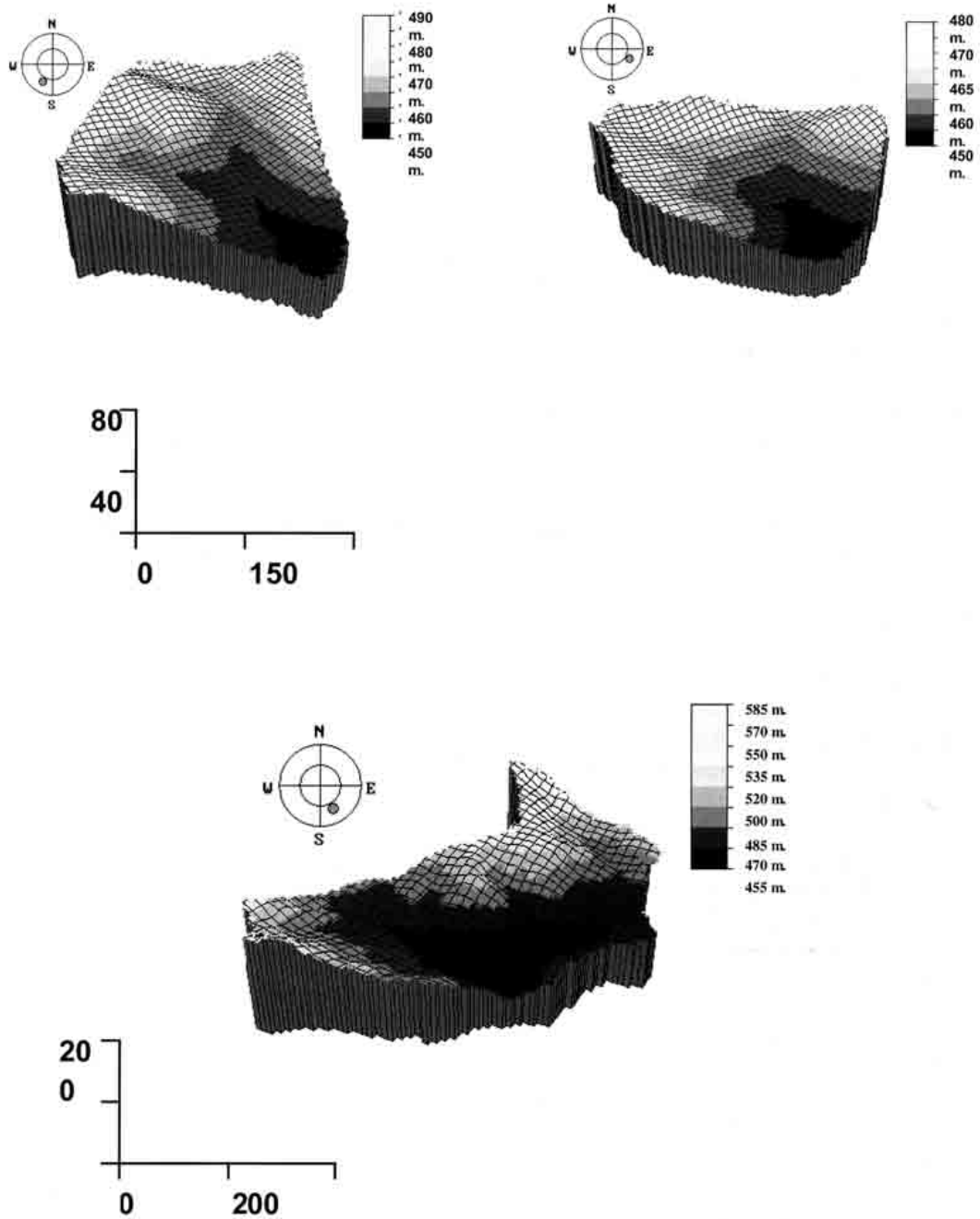


Figura 1. Modelos Digitales de Elevaciones de las tres cuencas analizadas.
 Figure 1. Digital Elevation Models of the three analysed watersheds.

Las coberturas digitales vectoriales resultantes se transformaron a formato matricial mediante el módulo de rasterización incluido en el Sistema de Información Geográfica «Idrisi». El MDE matricial resulta especialmente adecuado para los obje-

tivos de este estudio al representar la información de una forma sistemática y homogénea sobre el territorio, lo que simplifica notablemente tanto el diseño de los algoritmos de modelización como el acceso a la información correspondiente a cada

punto del terreno. De hecho, ésta ha sido la estructura de datos mayoritariamente utilizada a la hora de realizar análisis similares a los expuestos en este artículo (O'Callaghan & Mark, 1984; Band, 1986; Jenson & Domingue, 1988; Tribe, 1991, 1992; Maidment, 1993a; Jordan, 1994; Benosky & Merry, 1995; Gyasi-Agyei *et al.*, 1996).

El tamaño de celda escogido para la conversión a formato «raster» (2 metros) fue considerablemente pequeño, para evitar que en la transformación existieran pérdidas de detalle en la información. Sin embargo, hay que tener presente que el disminuir arbitrariamente el tamaño de la celda (por debajo de un determinado umbral) no conduce a resultados más precisos, ya que la información de cotas del MDE es en definitiva la que está contenida en los mapas topográficos originales, y el resto es introducida «artificialmente» mediante interpolación de la información anterior, sin una correspondencia real con la morfología del terreno. Por otro lado, al aumentar la resolución aumentan también los tiempos de computación necesarios, y aunque en este estudio éste no era un factor limitante puede serlo si se trabaja, por ejemplo, a escalas regionales.

El resto de las rutinas de cálculo y análisis necesarias en este artículo, correspondientes a lo expuesto en los apartados 2.2 y 3, se acometieron mediante la programación de aplicaciones informáticas desarrolladas específicamente para este estudio.

2.2 Modelización del movimiento de la escorrentía y el problema de la conectividad hidrológica

Una vez que contamos con la información topográfica contenida en un MDE, es posible obtener de manera automatizada la red de drenaje mediante algoritmos sencillos que tratan de modelizar el movimiento de la escorrentía por la superficie de la cuenca. Dichos algoritmos se basan en el principio de que el flujo superficial del agua se orienta según la línea de máxima pendiente. Suponen por tanto que son las fuerzas gravitatorias y, en definitiva, la geomorfología del terreno, las que determinan el movimiento del agua en la cuenca. En cuencas con una topografía marcada, esta hipótesis ha sido confirmada por diversos autores (Kirkby & Chorley 1967; Dunne *et al.*, 1975; O'Loughlin, 1981;

Beven & Wood, 1983). Sin embargo, Anderson & Kneale (1982) mostraron que en zonas con una topografía suave (pendientes menores del 10%) las fuerzas de gravedad ya no resultaban dominantes y el flujo de la escorrentía pasaba a estar controlado por fuerzas de succión que realmente no eran dependientes de la topografía. Por tanto, esta hipótesis resulta adecuada en zonas con relieve más o menos acusado (como es el caso de las cuencas analizadas, que presentan una pendiente media en torno al 30%), y no tanto en zonas llanas o planicies, en las que los cursos de agua pueden describir meandros no explicables basándose únicamente en la información topográfica de las cuencas.

Para determinar el movimiento de la escorrentía en el caso de los MDE matriciales, se considera que cada una de las celdillas del mismo tiene 8 vecinos (2 situados verticalmente, 2 horizontalmente y 4 según las diagonales), y se determina la dirección de flujo en esa celdilla considerando la dirección de mayor pendiente de las ocho circundantes. Esto se reduce al cálculo de la diferencia de cotas entre la celdilla central y las circundantes, dividiéndola por $\sqrt{2}$ en el caso de las celdillas situadas diagonalmente, y considerando obviamente que la cota de los vecinos a los que se orienta la escorrentía debe ser menor que la de la celdilla central. Este criterio es el que han adoptado mayoritariamente los diversos autores que han realizado análisis similares (O'Callaghan & Mark, 1984; Band, 1986; Jenson & Domingue, 1988; Tribe, 1991, 1992; Band, 1993; Maidment, 1993a, 1993b; Jordan, 1994; Benosky & Merry, 1995; Gyasi-Agyei *et al.*, 1996), y se trata de un criterio estándar en este tipo de aproximaciones. En la Figura 2 se muestra la asignación de las direcciones de flujo en un pequeño MDE hipotético para ilustrar el proceso.

Sin embargo, la asignación de direcciones de flujo no resulta siempre tan clara como en el caso «idealizado» de la Figura 2. De hecho, puede ocurrir que ninguna de las celdillas vecinas presente una altitud inferior a la de la celdilla en la que queremos definir el sentido de flujo (Figuras 3a y 3b). En estos casos, la dirección de flujo no está claramente definida, y se habla de que no existe conectividad hidrológica en el MDE. Este es uno de los principales problemas que hay que abordar para conseguir los resultados deseados, ya que unos

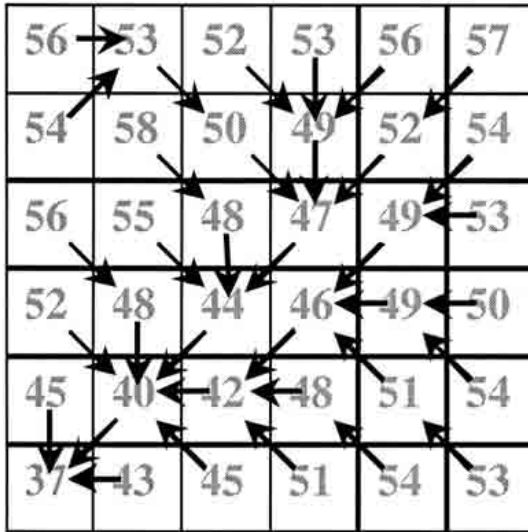


Figura 2. Asignación de flujos en un pequeño MDE ideal que no presenta problemas de conectividad hidrológica.
 Figure 2. Flow direction assignment in an ideal DEM with no problems of hydrological connectivity.

pocos puntos en los que no se dé la conectividad hidrológica pueden desbaratar todo el análisis del movimiento de la escorrentía por la cuenca.

Generalmente, la existencia en el MDE de puntos en los que no está definida la dirección de flujo se debe a errores o artificios en la captación o transformación de la información de altitudes (en alguna de las distintas fases que la componen), y no corresponden realmente a formas del terreno, salvo en zonas afectadas por fenómenos kársticos o glaciarios (Band, 1986; Tribe, 1992), que no se presentan en las cuencas aquí analizadas. Las causas que pueden provocar la introducción artificial de puntos en los que no está definida la conectividad hidrológica son variadas: errores en los procesos de digitalización o restitución fotogramétrica, pérdidas de detalle causadas por el redondeo de la información numérica contenida en los MDE (Nelson & Jones, 1995), artificios introducidos por interpolación (Tribe, 1992), etc. En este último caso, Hutchinson (1989) describe un método de interpolación que garantiza la conectividad hidrológica de la información matricial resultante; sin embargo, dicho método no está incluido en los sistemas de información geográfica disponibles actualmente, lo cual dificulta su aplicación en la práctica.

En cualquier caso, independientemente de las causas de los errores que puedan existir en un MDE, la solución más general al problema de la no conectividad hidrológica consiste en realizar un tratamiento corrector del MDE; en este sentido, uno de los métodos que se han propuesto consiste en aplicar filtros de media al MDE hasta que desaparezcan los errores que se desean eliminar (Mark, 1983; O'Callaghan & Mark, 1984). Sin embargo, una sola aplicación del MDE no garantiza la desaparición de todos los puntos sin conectividad hidrológica, y es necesario aplicar repetidas veces los filtros de media para obtener un MDE corregido. De hecho, generalmente son necesarias tantas pasadas que el MDE obtenido está completamente suavizado, perdiéndose buena parte de la información topográfica original y resultando una representación de las formas del relieve que puede ser muy deficiente. Otra aproximación que se ha descrito consiste en un rellenado artificial de las depresiones que pudieran existir en el MDE, y en una modificación de los algoritmos de movimiento de la escorrentía de manera que quede definida la dirección de flujo en las zonas llanas resultantes del rellenado anterior (Jenson & Domingue, 1988; Tribe, 1992).

En este estudio se ha optado por la aplicación de filtros de media pero, no a todo el MDE, sino sólo a aquellos puntos en los que la dirección de flujo no está adecuadamente definida, que generalmente constituyen una porción muy pequeña del mismo. Con esta variante, aunque son igualmente necesarias varias aplicaciones del filtro de media y la localización en cada una de las pasadas de los puntos en los que no existe conectividad hidrológica, los filtros se aplican de manera localizada y se evitan los inconvenientes del método original. En definitiva, la técnica aplicada consiste en sustituir las zonas llanas y depresiones por la tendencia del terreno en el entorno, preservando intacta la información topográfica original en las zonas que no precisan correcciones. En los MDE analizados, el porcentaje de celdillas que precisaron corrección de la altitud fue del 2.6%, y en estos puntos la variación media de la altura original fue tan solo de 0.35 m, lo cual ilustra la escasa modificación de la información original que fue necesaria para la obtención de un MDE en el que la conectividad hidrológica estuviera garantizada.

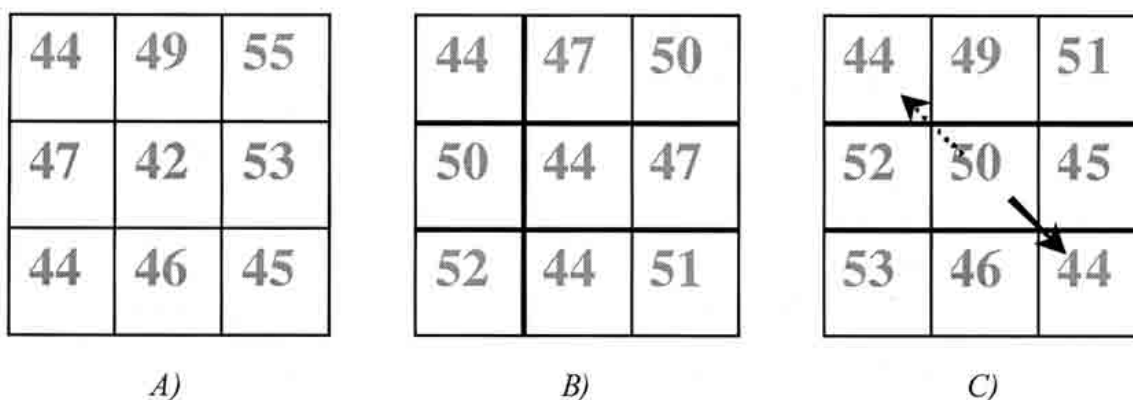


Figura 3. Tres casos en los que la dirección de flujo no está definida: A) Todas las celdillas tienen una altitud mayor a la de la celdilla central cuya dirección de flujo queremos asignar (depresión). B) Ninguno de los celdillas vecinas tiene una altitud inferior a la de la celdilla central, aunque alguna presenta la misma cota (zona llana). C) Hay dos direcciones en las que la pendiente es la misma. En estos casos el empate se resuelve asignando la escorrentía a la celdilla que tenga una mayor pendiente en las direcciones adyacentes (celdilla inferior derecha en el ejemplo de la figura).

Figure 3. Three cases in which flow direction is not defined: A) All surrounding cells have bigger elevations than the central one (pit). B) None of the surrounding cells has smaller elevation than the central cell, even though some of them have the same elevation (flat area). C) There are two directions in which the slope is identical. In these cases flow is assigned to that cell with a bigger slope in the adjacent cells (bottom left cell in the example of the figure).

Otra situación menos problemática que se puede presentar es que existan dos o más direcciones con la misma pendiente entre las 8 vecinas (Figura 3c). En este caso, hay que determinar a cuál de ellas «dirigimos» la escorrentía. Algunos autores asignan arbitrariamente el flujo a una de ellas (O'Callaghan & Mark, 1984; Jenson & Domingue, 1988; Skidmore, 1990), o seleccionan la dirección que suponga un menor quiebro en la línea de flujo (Bevaqua & Floris, 1987). Consideramos que el método más adecuado para resolver estos casos de empate entre varias direcciones es elegir aquella que tenga una mayor pendiente en las direcciones adyacentes, tal y como se ilustra en la Figura 3c.

3. Resultados y discusión

3.1 Determinación del área vertiente y la red de drenaje

Una vez resuelto el problema de la conectividad hidrológica, tenemos definida la dirección de flujo en cada uno de los puntos de la cuenca, con lo que podemos calcular el área vertiente correspondiente a cada una de las celdillas del MDE y a

partir de esta información obtener la red de drenaje de la cuenca.

El área vertiente (AV) en un determinado punto está constituida por el conjunto de puntos del terreno cuyas aguas vierten en el mismo. En términos de coberturas matriciales, determinar el área vertiente en una celdilla x consiste en conocer el número de celdillas del MDE cuyas líneas de flujo pasan por x . Esto es equivalente a determinar la cuenca hidrológica correspondiente al punto x , con la salvedad de que para la obtención de la red de drenaje sólo estamos interesados en la extensión total de AV, y no en su localización espacial concreta.

La determinación de AV en cada uno de los píxeles es posible a partir de la información correspondiente a la dirección de flujo en cada uno de los puntos de la cuenca. Basta con recorrer las líneas de flujo que parten de cada una de las celdillas del MDE e ir registrando los píxeles que reciben aporte de escorrentía procedente de la celdilla inicial. Repitiendo este proceso con cada uno de los puntos del MDE, finalmente conocemos cuántas celdillas vierten sus aguas en un determinado píxel x ; multiplicando ese número por el área de la celdilla (4 m^2 en nuestro caso) se obtiene la extensión del área vertiente en el punto x .

Evidentemente, los puntos que tengan una gran AV son los que corresponden a los cauces princi-

pales, es decir, aquéllos por los que se concentra gran cantidad de escorrentía cuando se produce un fenómeno lluvioso, mientras que los que tengan un AV baja serán aquéllos que reciben un escaso aporte de escorrentía por estar situados en determinadas situaciones topográficas (p. ej. cuerdas). Las celdillas con alto AV configuran las zonas por las que la escorrentía se va a mover preferentemente, y constituyen por ello la red de drenaje de la cuenca.

Los resultados de esta modelización para las cuencas analizadas muestran una distribución de frecuencias de los valores del área vertiente muy asimétrica (Figura 4), tal y como era de esperar, ya que gran parte de la escorrentía tiende a concentrarse en una pequeña porción del terreno.

Tradicionalmente la red de drenaje se representa como un elemento lineal simple (se considera que un punto del terreno pertenece o no a la red de drenaje), y no como una distribución continua de valores de AV por todo el territorio como la que resulta de los algoritmos de modelización de la escorrentía aplicados en este estudio. Para acomodarse a esta representación clásica, es necesario establecer un umbral U que defina los puntos del terreno pertenecientes a la red de drenaje; si $AV > U$,

entonces el punto en cuestión se considera parte de la red de drenaje (Figura 5). No se puede establecer una regla fija para determinar este umbral: si U es más bajo, quedarán incluidos cauces por los que drena un caudal relativamente pequeño, mientras que si U es más alto seremos más restrictivos en la definición de red de drenaje e incluiremos sólo cauces con una mayor importancia en lo relativo al aporte de escorrentía recibido. En cada caso se deberá fijar el valor de U considerado más adecuado en función de los objetivos del análisis, de acuerdo con las observaciones de campo realizadas y las características del terreno (Felicísimo, 1994; Martz & Garbrecht, 1995).

En la Figura 5 se muestran los resultados correspondientes a la cuenca 3 para distintos valores del umbral U , que obviamente configuran redes de drenaje más densas conforme disminuye dicho umbral.

3.2 Nivel de detalle alcanzable en la delineación de la red de drenaje a partir de MDE

Una pregunta que se puede plantear sobre los resultados del análisis es el nivel de detalle acerca de la red de drenaje que podemos obtener con el

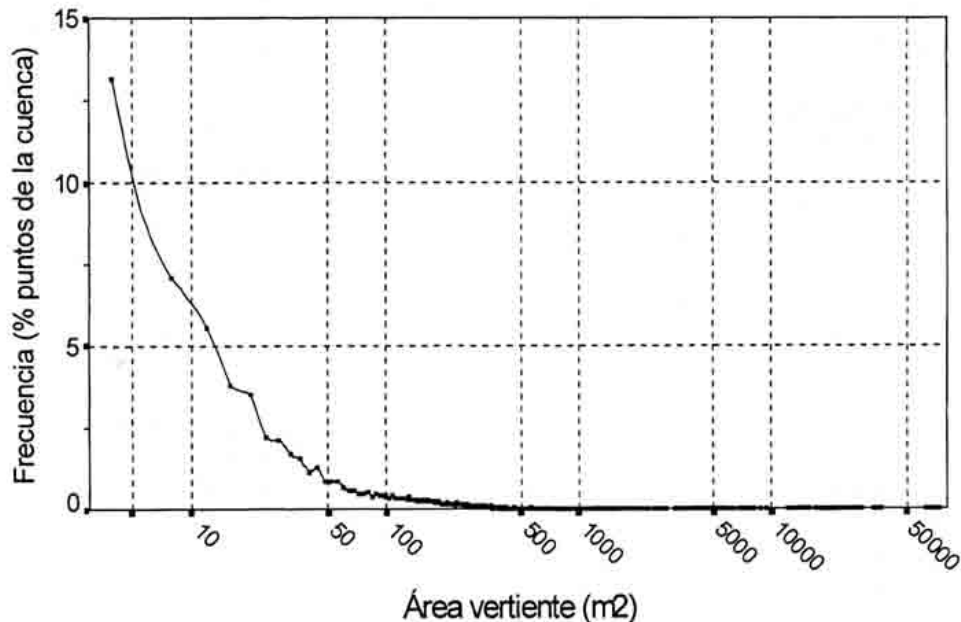


Figura 4. Histograma de frecuencias de los valores del área vertiente (AV) en cada una de las celdillas del MDE de la cuenca 1.
 Figure 4. Contributing area frequencies histogram for each of the cells in DME of watershed 1.

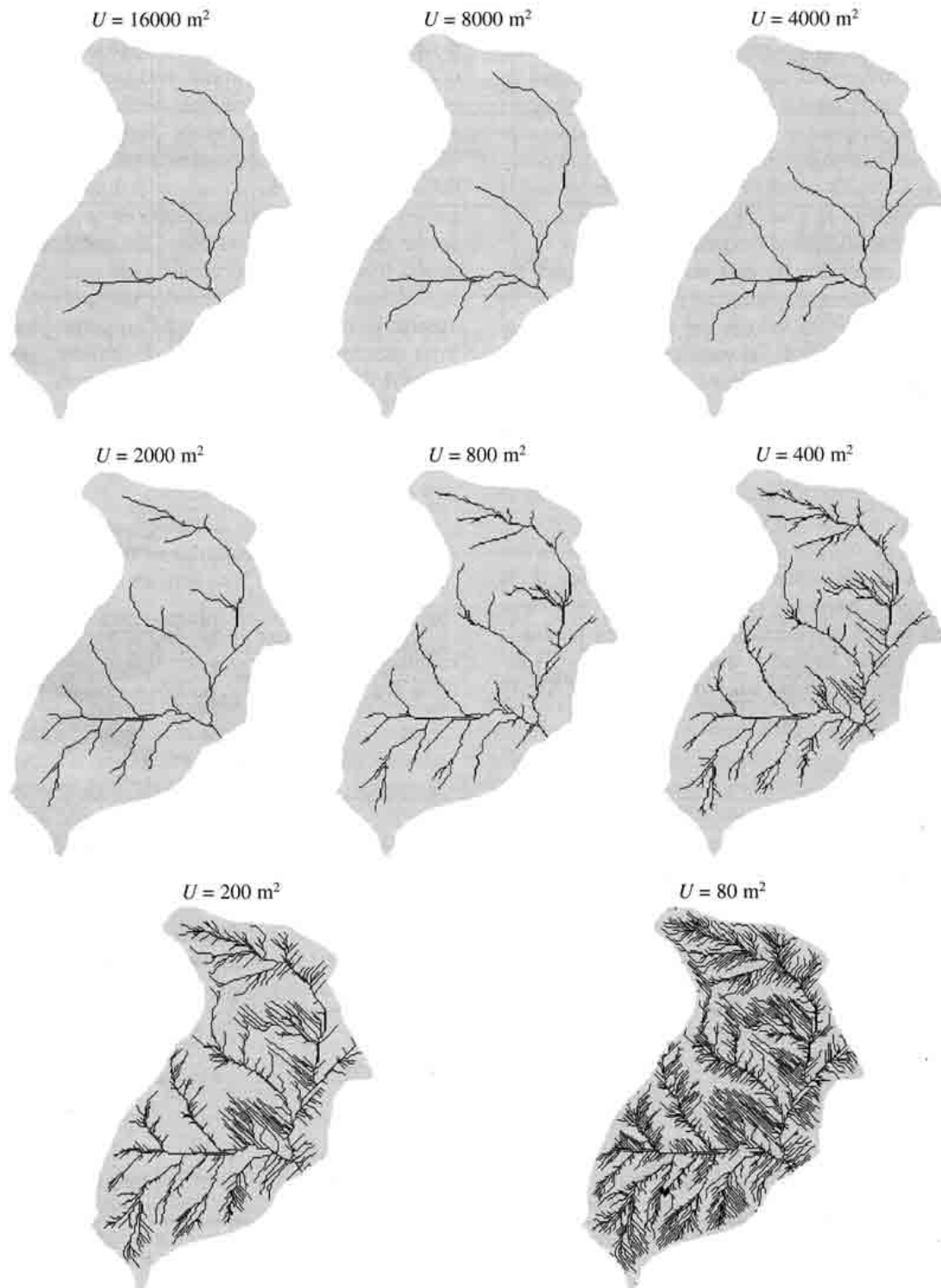


Figura 5. Red de drenaje obtenida para distintos valores del umbral de área vertiente (U) en la cuenca 3.
Figure 5. Obtained drainage network corresponding to different values of the contributing area threshold (U) in watershed 3.

mismo. Obviamente, la información primaria de la que se parte, el MDE, tiene una limitación en cuanto a las escalas en las que la información es realmente «fiable», que es la determinada por el detalle disponible en los mapas topográficos originales, en este caso de escala 1:5000. En concreto, parte de la información contenida en el MDE procede de la interpolación de los datos del mapa original, no correspondiendo por tanto a la morfología real del terreno, sino a una tendencia suavizada y artificial introducida por interpolación. Es suficientemente conocido en el ámbito de la geoestadística que las técnicas de interpolación, aun pudiendo ser adecuadas para obtener estimaciones localmente precisas, no reproducen adecuadamente la variabilidad espacial de los sistemas analizados (Deutsch & Journel, 1992; Englund, 1993; Myers, 1996). En definitiva, no cabe esperar que los resultados derivados mediante modelización a partir de los MDE sean aplicables a cualquier escala, sea esta tan detallada como queramos, ya que los resultados del mismo no pueden ser más «finos» que los de la propia información topográfica de la que se parte.

En este sentido, se puede apreciar en la Figura 5 que a medida que disminuye U (y somos más laxos en la definición de red de drenaje), empiezan a aparecer estructuras que no tienen el aspecto dendrítico y bifurcado que se presenta para valores mayores de U , sino que surgen una serie de conjuntos de cauces paralelos, que se aprecian ya de forma masiva para los casos en los que $U=200 \text{ m}^2$ y $U=80 \text{ m}^2$ (Figura 5). Este tipo de estructuras fueron también detectadas por Tribe (1991, 1992) en la delineación de la red de drenaje a partir de MDE. Esta fisonomía de la red de drenaje que aparece para valores más bajos de U no se corresponde realmente con la existente en el terreno en las cuencas analizadas; por un lado desde luego esa apariencia no resulta muy realista desde el punto de vista de la simple apreciación visual, y en las observaciones realizadas en campo tampoco se ha detectado esa estructura de «cauces paralelos».

En la Figura 6 se representa en el eje vertical el porcentaje de celdillas del MDE que tienen un área vertiente menor o igual que una determinada superficie especificada en el eje x ; en definitiva, represen-

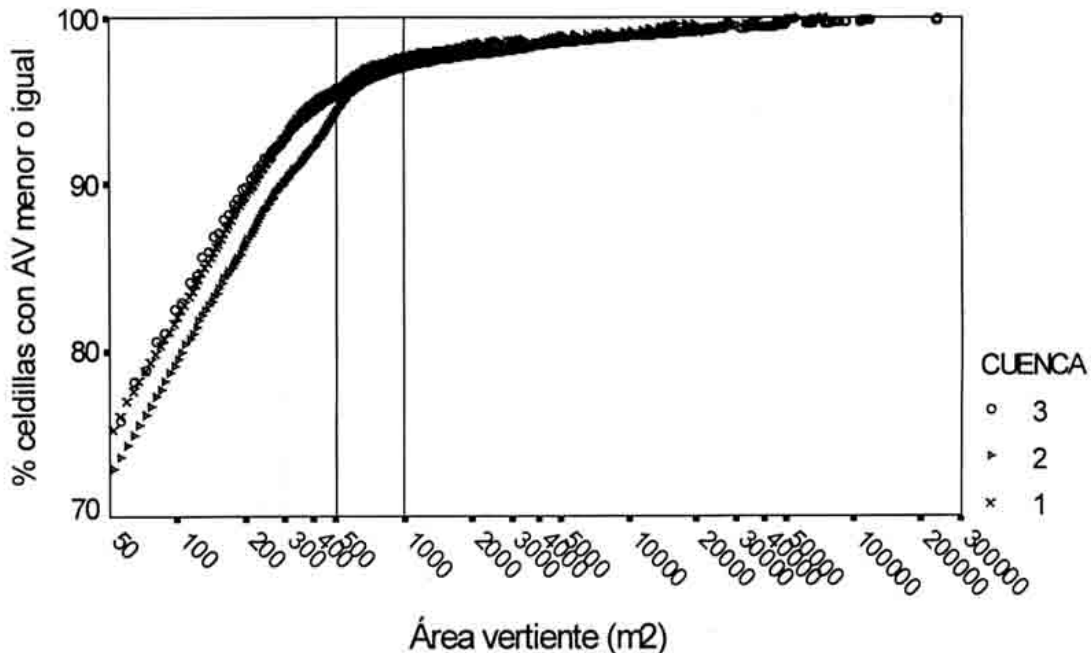


Figura 6. Porcentaje de puntos que no pertenecen a la red de drenaje (eje y) para distintos valores del umbral de área vertiente (eje x).
 Figure 6. Percent of watershed area that is not included in the delineated drainage network (y axis) as a function of the contributing area threshold (x axis).

ta el porcentaje de puntos que no forman parte de la red de drenaje para distintos valores del umbral U . Puede observarse que la pendiente de esa gráfica es muy constante para los valores altos de U , y muy similar o igual en las gráficas correspondientes a las tres cuencas analizadas. En los tres casos se produce un claro quiebro en esa tendencia en torno a 500-1000 m^2 , pasándose a un tramo para los valores más pequeños del eje x que presenta una pendiente claramente distinta y mayor que el tramo anterior.

Lo que ocurre es que, en la realidad, el agua se mueve por la cuenca siguiendo principalmente cauces, regueros y cárcavas, y la escorrentía se concentra en unos pocos puntos del terreno, dándose por tanto los valores altos del área vertiente en un pequeño porcentaje de la extensión de la cuenca. Debido a este fenómeno de concentración de la escorrentía, el incremento del número de píxeles que tienen un área vertiente mayor que la especificada es suave cuando aumentamos el umbral de área vertiente, como ocurre en el tramo derecho de la gráfica (Figura 6). Por el contrario, en el caso hipotético de que el agua corriese por superficies lisas y sin una variabilidad espacial definida, el caudal tendería a discurrir mucho más homogéneamente por el terreno, sin producirse esa concentración de la escorrentía. Por tanto, en este caso la pendiente de la gráfica sería mucho mayor. De hecho, en el tramo izquierdo de la Figura 6 se da una pendiente mucho más marcada y claramente diferenciada de la del tramo derecho. Este cambio en la curva (Figura 6) sólo se puede deber a una variación radical en las características de la información topográfica de la que se alimenta el modelo. Se pasa de una morfología definida por la información topográfica a escala 1:5000 a otra mucho más «lisa», carente de la variabilidad y riqueza espacial existente realmente en las cuencas, y que corresponde precisamente a la tendencia suavizada introducida por interpolación para las escalas menores a la disponible en la información topográfica original.

Así, el quiebro o zona de transición entre los dos tramos de la Figura 6 nos permite determinar el rango de valores del umbral U para el que es válido y realista el resultado del modelo. Para valores de U por debajo de 500-1000 m^2 los detalles de la red de drenaje obtenidos deben considerarse no correspondientes realmente a lo que se presenta en el terreno (Figura 5).

La apariencia de las curvas representadas en la Figura 6 es sorprendentemente similar en las tres cuencas analizadas lo cual es debido a que, a pesar de que corresponden a zonas distintas, la información topográfica tiene en los tres casos las mismas características y nivel de detalle (mapas topográficos a escala 1:5000). Es de destacar la gran uniformidad de la pendiente de la Figura 6 en un rango tan amplio como de 1000 m^2 hasta más de 100000 m^2 , lo cual es sin duda expresión de una autosemejanza con la escala en la red de drenaje delimitada.

Este análisis constituye un nuevo método de validación de los resultados del modelo muy potente, ya que permite conocer el rango de escalas en el que son válidas las conclusiones del modelo sin necesitar información alguna sobre las características o escala de la información topográfica original. Realmente, aun conociendo dicha información, es este método el que permite determinar el nivel de detalle que se puede considerar válido y realista a partir de los resultados del análisis. Se trata de un método de validación interna, ya que se basa únicamente en analizar los propios resultados del modelo, sin que necesariamente haya que recurrir a la comparación con otro conjunto de datos externo o independiente al del análisis en cuestión. Técnicas similares, aunque en otro contexto, han sido descritas por Polidori (1994).

En cualquier caso, las redes de drenaje delimitadas en este estudio han mostrado ser, dentro del rango de escalas determinado de acuerdo al método anterior, coincidentes con las observaciones de campo realizadas en las tres cuencas experimentales. Resultados similares, en lo referente a la validez de este tipo de métodos automáticos de extracción de la red de drenaje, fueron también obtenidos por Jenson & Domingue (1988) y Gyasi-Agyei *et al.* (1996).

3.3 Posibles extensiones del modelo

La aplicación de los métodos expuestos se basa en la hipótesis de que la escorrentía se genera uniformemente por toda la cuenca. Obviamente, esta homogeneidad no tiene por qué darse, ya que las variaciones en pendiente, tipo de suelo y vegetación hacen que la tasa de infiltración sea espacialmente variable a lo largo del territorio. En este sentido, se pueden construir modelos hidrológicos más completos que, basán-

dose en los métodos descritos, incorporen la influencia de otras variables espaciales (como son aquéllas relativas a las características de la vegetación y el suelo), aprovechando las posibilidades que en este sentido brindan los Sistemas de Información Geográfica. Ello permite en definitiva cuantificar la variabilidad espacial de procesos como la infiltración, evapotranspiración, etc., haciendo los resultados aplicables a un abanico de situaciones más amplio y permitiendo desarrollar modelizaciones hidrológicas más detalladas (e.g. Benosky & Merry, 1995).

En cualquier caso, el enfoque descrito, en el que la única entrada en el modelo son los datos topográficos contenidos en el MDE, resulta ser muy adecuado dada su simplicidad y la calidad de los resultados obtenidos en lo que a la delineación de la red de drenaje se refiere. Hay que tener en cuenta que la hipótesis de que la escorrentía se genera uniformemente por toda la cuenca se cumple cuando, ante una precipitación de suficiente duración o intensidad, el suelo se encuentra saturado y toda la precipitación se evacúa en forma de escorrentía.

Un paso más en la modelización consiste en incluir el componente temporal en el modelo, considerando la modelización de la respuesta temporal de los procesos hidrológicos que intervienen en el análisis (como puede ser una tasa de infiltración variable a medida que la precipitación progresa y el suelo se va saturando). El resultado es un modelo espaciotemporal hidrológico completo (e.g. Gyasi-Agyei *et al.*, 1996), que permite obtener el hidrograma en cada uno de los puntos de la cuenca ante determinados eventos lluviosos, aunque para ello obviamente se requiere una adecuada modelización de los fenómenos implicados y una correcta estimación de los parámetros involucrados.

En definitiva, las posibilidades existentes en este campo son muy amplias, y se pueden aplicar para modelizar otros muchos fenómenos, como por ejemplo el movimiento de contaminantes liberados en un determinado punto de la cuenca. En cualquier caso, la base de la modelización del flujo de la escorrentía es la misma que la expuesta anteriormente, que se puede ver mejorada o complementada con consideraciones más detalladas en función de los objetivos de cada estudio.

4. Conclusiones

La extracción automatizada de la red de drenaje es plenamente factible a partir de la información topográfica contenida en los Modelos Digitales de Elevaciones, obteniéndose de hecho resultados acordes con las observaciones de campo y de mayor calidad que los proporcionados por los tradicionales métodos manuales de delineación de la red de drenaje sobre los mapas topográficos.

Las ventajas de estos métodos automáticos frente a los manuales son varias (Jenson & Domingue, 1988; Tribe, 1992), pudiendo resumirse en los siguientes puntos:

Mayor precisión de los resultados obtenidos, que no están sujetos a los errores propios de los métodos manuales.

Menores costes del proceso de delineación de la red de drenaje. Una vez acometida una pequeña inversión en equipos informáticos y programas relacionados (cada vez menor dado el continuo desarrollo y difusión de estos elementos), el proceso de extracción de la red de drenaje se realiza a un coste mínimo, dado el carácter automático del mismo.

Repetibilidad y objetividad de los resultados: los resultados obtenidos no dependen de la variabilidad en los criterios de los operarios, ni de su mayor o menor habilidad o experiencia. El análisis automático está libre de subjetividad, haciéndose así plenamente comparables los resultados obtenidos en distintas zonas y ocasiones.

Facilidad de un tratamiento y análisis cuantitativo, basada en computadoras y Sistemas de Información Geográfica, de los resultados. Éstos se presentan directamente en forma numérica, permitiendo análisis más rigurosos y potentes, algunos de los cuales no eran abordables anteriormente.

Como inconveniente únicamente se pueden citar los mayores requerimientos en equipos informáticos y personal especializado, así como los asociados a la disponibilidad de los MDE. Sin embargo, dadas las ventajas anteriores, que redundan en una mayor calidad de los resultados y en un menor coste en tiempo y dinero del proceso, la utilización de los métodos expuestos es altamente recomendable en la mayoría de las aplicaciones.

Las técnicas expuestas para la extracción de la red de drenaje son sencillas y aplicables a un amplio abanico de situaciones; únicamente requieren para

su aplicación que esté garantizada la conectividad hidrológica del MDE, existiendo técnicas de tratamiento de los mismos que la aseguran.

Por otro lado, el método de validación interna propuesto permite determinar el rango de escalas en el que los resultados del análisis se corresponden realmente con la morfología del terreno, evitando un uso inadecuado de los mismos más allá del nivel de detalle discernible con la información topográfica de la que se alimenta el modelo.

Otros modelos hidrológicos más completos, tanto en el plano espacial como temporal, se pueden construir a partir de los métodos descritos, que en cualquier caso son la base para la modelización de la influencia de la topografía en la variabilidad espacial de la escorrentía en las cuencas hidrológicas.

Los métodos y resultados expuestos permiten igualmente realizar una jerarquización automática de la red de drenaje (Felicísimo, 1994), cuantificar los diversos parámetros morfométricos habitualmente utilizados para caracterizar las cuencas y sus redes de drenaje (e.g. Benosky & Merry 1995) y delimitar de manera precisa y objetiva las cuencas hidrológicas a partir de los datos contenidos en un MDE (Jenson & Domingue 1988).

Todo ello constituye un buen ejemplo de cómo la continua mejora de los equipos informáticos y la mayor disponibilidad de información espacial, asociada al desarrollo de la teledetección y los Sistemas de Información Geográfica, brindan nuevas posibilidades en el ámbito de las ciencias de la tierra y, en particular, en el campo de la modelización hidrológica.

Agradecimientos

El presente estudio se desarrolló en el marco de una Beca de Introducción a la Investigación del Consejo Superior de Investigaciones Científicas otorgada a Santiago Saura Martínez de Toda en el año 1998, del proyecto «EPROHIDRO» (HID98-1056-CO2-01) financiado por la CICYT (Plan Nacional de I+D) y del Programa RESEL financiado por la Dirección General de Conservación de la Naturaleza-MIMAM.

Referencias bibliográficas

Anderson, M.G. & P.E. Kneale. (1982). The influence of low-angled topography on hillslope soil-water convergence and stream discharge. *Journal of Hydrology*, 57, 65-80.

- Band, L. E. (1986). Topographic partition of watersheds with digital elevation models. *Water Resources Research*, 22, 15-24.
- Band, L.E. (1993). Extraction of channel networks and topographic parameters from digital elevation data. En: *Channel network hydrology* (K. Beven & M.J. Kirkby, eds.). John Wiley & Sons, Chichester, 13-42.
- Benosky, C.P. & Merry, C.J. (1995). Automatic extraction of watershed characteristics using spatial analysis techniques with application to groundwater mapping. *Journal of Hydrology* 173, 145-163.
- Bevaqua, G. & Floris, R. (1987). A surface-specific line tracking and slope recognition algorithm. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 40, 219-227.
- Beven, K. & E.F. Wood. (1983). Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing areas. *Journal of Hydrology*, 65, 139-158.
- Burrough, P.A. (1986). *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. Monographs on Soil and Resources Survey N° 12. Oxford University Press.
- Deutsch, C.V. & Journel, A.G. (1992). *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press.
- Doyle, F.J. (1978). Digital terrain models: an overview. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 44, 1481-1485.
- Dunne, T., Moore, T.R. & Taylor, C.H. (1975). Recognition and prediction of runoff-producing zones in humid regions. *Hydrol. Sci. Bull.*, 20, 305-327.
- Englund, E.J. (1993). Spatial simulation: environmental applications. En: *Environmental Modeling with GIS*. (M.F. Goodchild, B.O. Parks y L.T. Steyaert eds.). Oxford University Press, 432-437.
- Felicísimo, A.M. (1994). *Modelos Digitales del Terreno: Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales*. Pentalfa Ediciones. Oviedo.
- Gyasi-Agyei, Y., de Troch, F.P. & Troch, P.A. (1996). A dynamic hillslope response model in a geomorphology based rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology* 178, 1-18.
- Hutchinson, M.F. (1989). A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology* 106, 211-232.
- 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, 1593-1600.
- Jordan, J. P. (1994). Spatial and temporal variability of storm-flow generation processes on a Swiss catchment. *Journal of Hydrology*, 153, 357-382.
- Kirkby, M.J. & Chorley, R.J. (1967). Throughflow, overland flow and erosion. *Bull. Int. Assoc. Sci. Hydrol.*, 12, 5-21.
- Maidment, D.R. (1993a). Developing a spatial distributed unit hydrograph by using GIS. *HydroGIS 93: Application of Geographic Information Systems in Hydrology and Water Resources*, Vienna, 181-192.

- Maidment, D.R. (1993b). GIS and hydrologic modeling. En: *Environmental Modeling with GIS*. (M.F. Goodchild, B.O. Parks y L.T. Steyaert eds.). Oxford University Press, 147-167.
- Mark, D.M. (1983). Automated detection of drainage networks for digital elevation models. *Proceedings of Auto-Carto 6*, vol. 2, Ottawa, Ontario, Canada, 288-298.
- Martz, L.W. & Garbrecht, J. (1995). Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method – Comment. *Journal of Hydrology* 167, 393-396.
- Myers, D.E. (1996). Choosing and using simulation algorithms. En: *Proceedings of the Spatial Accuracy Assessment in Natural Resources and Environmental Sciences (Second International Symposium)*. (H.T. Mowrer, R.L. Czaplewski y R.H. Hamce, eds.). Fort Collins, Colorado, US Department of Agriculture, 23-29.
- Nelson, E.J. & Jones, N.L. (1995). Reducing elevation roundoff errors in digital elevation models. *Journal of Hydrology* 169, 37-49.
- O'Callaghan, J.F. & Mark, D.M. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28, 323-344.
- O'Loughlin, E. M. (1981). Saturation regions in catchments and their relation to soil and topographic properties. *Journal of Hydrology*, 53, 229-246.
- Polidori, L. (1994). Fractal-based evaluation of relief mapping techniques. En: *Fractals in Geoscience and Remote Sensing*. (G.G. Wilkinson, I. Kanellopoulos y J. Mégier, eds.). *Proceedings of a Joint JRC/EARSel Expert Meeting*. Institute for Remote Sensing Applications. Ispra (Italia). Image Understanding Research Series Vol. 1. Report EUR 16092 EN, 277-297.
- Skidmore, A.K. (1990). Terrain position as mapped from gridded digital elevation model. *International Journal of Geographic Information Systems*, 4, 33-49.
- Tribe, A. (1991). Automated recognition of valley heads from digital elevation models. *Earth Surface Processes and Landforms*, 16, 33-49.
- Tribe, A. (1992). Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method. *Journal of Hydrology*, 139, 263-293.

Recibido el 25 de enero de 2000

Aceptado el 8 de junio de 2000