

ESTRATEGIAS PARA LA ESTIMACIÓN AUTOMÁTICA DE DIRECCIONES DE DRENAJE A PARTIR DE MODELOS DIGITALES DE TERRENO

Jorge Mario Ramírez y Jaime Ignacio Vélez

Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos, Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia

Sede Medellín

jivelezu@unalmed.edu.co

Recibido para evaluación: 6 Septiembre de 2002 / Aceptación: 13 de Noviembre de 2002 / Recibida versión final: 25 de Noviembre de 2002

RESUMEN

Se presenta una descripción de metodologías que permiten estimar automáticamente las direcciones de flujo a partir de modelos digitales de terreno y realizar cálculos de parámetros y mapas de variables geomorfológicas derivadas. Se usa el modelo D8 y se describen nuevas metodologías para la asignación de direcciones en celdas de dirección indeterminada. Se propone un algoritmo para la corrección de sumideros que combina el corte y el llenado de celdas mediante criterios globales. Se muestran algoritmos que permiten forzar el drenaje de un modelo digital de terreno para que se ajuste a información real de la trayectoria de las corrientes. Las metodologías descritas se incorporaron al módulo de análisis de modelos digitales de terreno construido para el software HidroSIG Java.

PALABRAS CLAVE: Modelos de Elevación Digital, Modelos Digitales de Terreno, Direcciones de Flujo, Redes de Drenaje, Incisión de Canales.

ABSTRACT

A description of methodologies for the automated estimation of drainage directions and geomorphological parameters from Digital Elevation Models is presented. The D8 drainage model is used and new methodologies for the estimation of drainage direction in undetermined pixels are presented. We propose a new algorithm for the correction of pits which combines filling and breaching techniques controlled by global criteria. A methodology for the inclusion of the blue lines information in the extraction of drainage patterns is proposed, such that the automated estimated drainage network matches reality. The aforementioned methodologies are implemented in a functional module of the HidroSIG Java GIS software.

KEYWORDS: Digital Elevation Model, Digital Terrain Model, Flow Directions, Drainage Network, Channel Networks, Hannel Head Formation, Drainage Flowpaths.

1. INTRODUCCIÓN

Los modelos digitales de terreno o MDT, se han convertido en herramientas muy populares para el almacenamiento y procesamiento de información topográfica. En particular, la representación de la topografía según mallas rectangulares regulares, en la cual la distribución de cotas se aproxima con un arreglo rectangular de píxeles, ha probado ser la manera más útil y eficiente para la construcción de MDT's (Band, 1986; Rodríguez-Iturbe, 1999; Wechsler 2001). La importancia y uso de estos MDT's ha aumentado desde la publicación de los trabajos de Jenson y Domingue (1988), en donde se reportan por primera vez metodologías para la derivación automática de información geomorfológica e hidrológica a partir de los MDT's. Desde ese entonces han aparecido nuevas metodologías en esta dirección, todas con una estrategia general común: primero estimar las direcciones de flujo sobre la superficie del terreno y, posteriormente, ubicar la trayectoria de los cauces para definir la red de drenaje y sus características geomorfológicas. El objetivo general de este trabajo es proponer metodologías para la automatización de la extracción de las direcciones de flujo según el modelo D8. Los algoritmos que se describen aquí, han sido incorporados al módulo de análisis de MDT's del sistema de información geográfica HidroSIG Java (Vélez et. al. 2002).

Existen diferentes metodologías para la estimación de direcciones de flujo a partir de MDT's (ver Tarboton 1997 para una buena revisión), y entre ellas, el modelo de direccionamiento D8 (Faifield y Leymarie 1991) ha encontrado gran acogida por su simplicidad. Según este modelo, el drenaje de una celda es dirigido hacia la celda adyacente en la dirección de la máxima pendiente negativa. En la implementación de este modelo aparecen algunos problemas que deben ser resueltos antes de la estimación de las direcciones de drenaje, y que se presentan cuando una celda no tiene una celda adyacente más baja hacia la cual drenar. Estos problemas ocurren en todos los MDT's y se suponen asociados a errores de medición, fallas en la interpolación, y problemas de resolución. El tipo de problemas más grave se conoce como "sumideros" y consisten en grupos cerrados de celdas con la misma cota y que están rodeados por celdas más altas. Para la corrección de los sumideros se ha usado generalmente la metodología del "llenado" o "flooding algorithm" propuesto por Jenson y Domingue (1988), y

más recientemente, el algoritmo de rompimiento propuesto por Garbrecht y Martz (1999). En este trabajo se propone un algoritmo similar a este último, en el cual se tienen en cuenta las celdas tributarias de los sumideros, y combina el aumento y la disminución de cotas en el MDT para asignarle drenaje a las celdas del sumidero. Por otra parte, se muestra un criterio que emula la inercia del flujo, para decidir direcciones de drenaje en las celdas de las costas de un MDT, y en aquellas que tienen varias celdas igualmente factibles hacia las cuales drenar.

Se ha encontrado que el modelo de direccionamiento D8 reproduce bien la red de drenaje en cuencas de área tributaria grande y corrientes bien formadas (Martz y Garbrecht, 1992). A pesar de esto, la limitación de usar sólo ocho direcciones de drenaje, hace que el modelo D8 no represente de manera precisa el flujo divergente en zonas convexas (Freeman, 1991) conduciendo a errores en la estimación de la trayectorias de corrientes con área tributaria pequeña, especialmente en MDT's de baja resolución. Por otra parte, la información de la red de drenaje real de un terreno (comúnmente llamada «líneas azules») es, en la mayoría de los casos, igual de accesible que la información topográfica. Consecuentemente, en la última parte de este trabajo, se propone una metodología para incorporar la información de las líneas azules en la estimación de las direcciones de drenaje como una estrategia para minimizar los errores introducidos por el modelo D8, especialmente en las zonas de formación de los canales.

2. MOTIVACIÓN

La asignación de direcciones del modelo D8 confía en que para cada celda c_1 existe una única celda c_2 adyacente a c_1 , tal que la cota de c_2 sea menor que la de c_1 , y la pendiente en la dirección c_1 - c_2 sea la máxima entre las ocho direcciones posibles. Existen tres situaciones en las cuales esta asignación no se puede efectuar:

- La celda c_1 está rodeada por ocho celdas de altura mayor que ella (Figura 1a). En este caso se habla de un "pit".
- La celda c_1 hace parte de un grupo de celdas con la misma cota (Figura 1b). A estos grupos se les conoce como zonas planas. En el caso de que la zona plana esté rodeada por celdas más altas, se le conoce como sumidero.

- Existe más de una celda adyacente a c_i con pendiente igual a la máxima (Figura 1c). A este problema se le puede llamar una indeterminación y también ocurre cuando c_i se encuentra en un borde o costa del MDT.

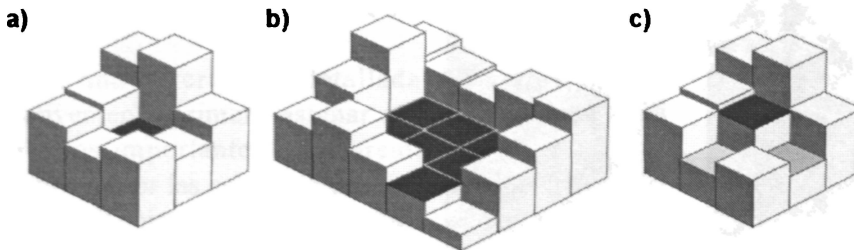


FIGURA 1.

Problemas en la estimación de direcciones de drenaje.

Estos problemas aparecen en todos los MDT y se aceptan como espurios (Martz y Garbrecht 1999). En general, su presencia responde a factores tales como: errores de medición, texturas artificiales producidas por la interpolación, baja resolución vertical, o falencia de la resolución horizontal del MDT para representar los rasgos de la topografía del terreno.

Debido a que los sumideros y las zonas planas se aceptan como espurios, la estrategia para su corrección apunta a modificar el MDT hasta que a cada una de las celdas se les pueda asignar una dirección de drenaje. La corrección de los pits es inmediata: se aumenta la cota de la celda involucrada hasta la adyacente de cota mínima, creando así una zona plana. Para asignar direcciones de flujo en zonas planas, Garbrecht y Martz (1997) propusieron un algoritmo mediante el cual se realizan pequeñas modificaciones sucesivas en la cota de las celdas de la zona plana, de manera que el flujo se aleje de las celdas más altas que rodean la zona plana, y converja hacia las celdas más bajas de su salida.

Para los sumideros producidos por zonas planas deprimidas, existen dos maneras básicas de corrección. La primera fue propuesta por Jenson y Domingue (1988), y supone que todos los sumideros son producidos por la subestimación de la cota en las celdas del sumidero; de esta manera, la corrección opera como en los sumideros de una sola celda, elevando la cota de las celdas del sumidero hasta la mínima de las celdas adyacentes a él. A éste procedimiento se le conoce como “llenado” o “flooding algorithm”. La otra estrategia supone que

pueden existir sobreestimaciones de la altura en las celdas adyacentes al sumidero y que, por lo tanto, éste puede ser corregido “cortando” algunas celdas para permitir el flujo fuera del sumidero; además parte de la observación que la corrección cortando afecta, en general, muchas menos celdas que el llenado. En esta dirección, Garbrecht y Martz (1999) propusieron un algoritmo que combina las dos técnicas y parece solucionar todas las configuraciones posibles de sumideros. Según este algoritmo, alrededor de cada sumidero, se realiza una búsqueda circular para identificar sus celdas cercanas cuyo drenaje podría estar dirigido hacia el sumidero. Posteriormente, en la frontera de este grupo de celdas, se buscan celdas candidatas para ser cortadas; entre ellas se escoge la celda de mínima cota y que tenga máxima pendiente hacia fuera de la zona del sumidero, además se verifica que no esté a una distancia mayor de dos celdas del sumidero. En caso de no encontrar tal celda, se procede a llenar el sumidero.

La Figura 2 muestra la ubicación de los sumideros en un MDT de la cuenca del río La Vieja en la zona central de los Andes colombianos. Este MDT tiene una extensión de 66 km en dirección longitudinal y 85 km en sentido latitudinal, y fue construido a partir de interpolación de curvas de nivel de regular calidad, la resolución escogida fue 200 m y las alturas están dadas con precisión entera. El número de columnas es de 659 y las filas suman 865. La región mapeada se caracteriza por cambios bruscos en el paisaje y valles muy angostos producto de fuertes controles geológicos del cauce de los ríos.

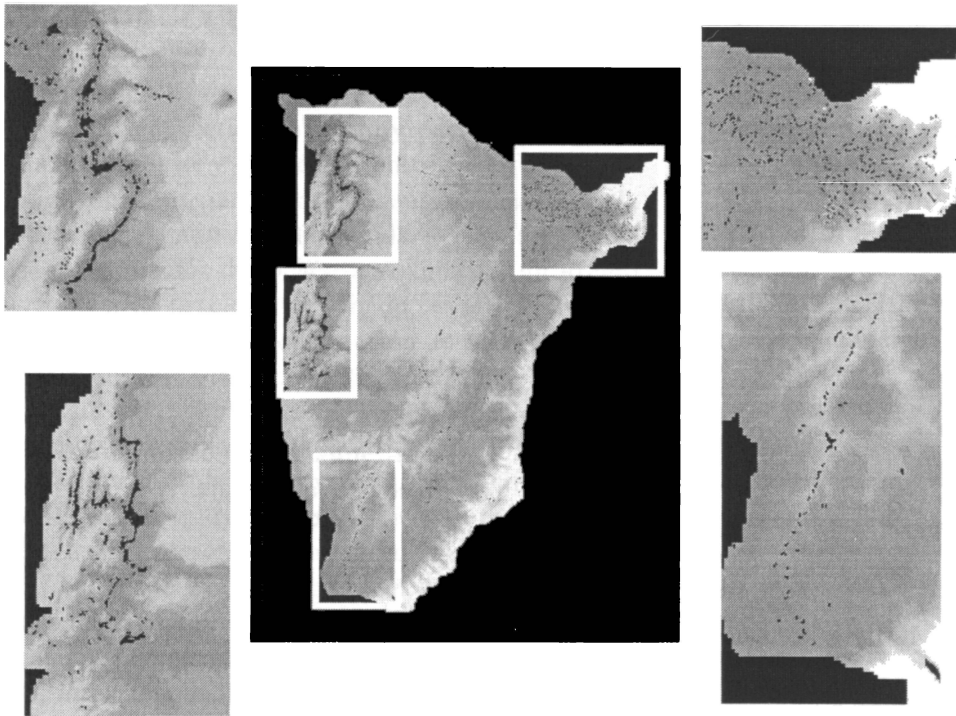


FIGURA 2.

MDT de la cuenca del río La Vieja (Colombia) con los sumideros en negro. Los recuadros blancos muestran los acercamientos sobre diferentes áreas del MDT.

Como resultado de las características del terreno, muchos de los sumideros del MDT se encuentran alineados en las trayectorias de los cauces y son, en su mayoría, producidos por errores de interpolación que sobreestiman las cotas en las secciones angostas de los valles. Esta situación sugiere que la corrección de sumideros debe realizarse en orden, desde las cotas altas a las más bajas; luego, una vez corregido un sumidero, realizar búsquedas locales y correcciones de zonas planas y nuevos sumideros en el área considerada durante la corrección del sumidero original. Con esta estrategia se consigue corregir de una manera sucesiva y exhaustiva los grupos de sumideros que tengan áreas tributarias anidadas, garantizando que la corrección se hace en la dirección natural del flujo. Existe una ventaja global muy importante de esta metodología con respecto a la propuesta por Garbrecht y Martz: debido a que la corrección se hace de manera ordenada, cuando se va a corregir un sumidero se tienen determinadas las direcciones de flujo de todas las celdas aguas arriba del sumidero, y por lo tanto, se puede usar toda la información de la cuenca real del sumidero para determinar el área de búsqueda para las celdas a intervenir en la corrección. En este trabajo se propone un algoritmo que utiliza la metodología global introducida arriba, y una estructura orientada a objetos; además propone nuevos criterios para decidir la mejor forma de corrección

de un sumidero y la identificación de las celdas a cortar y/o llenar.

El problema de las celdas con dirección indeterminada (Figura 1c) es, en general, más raro y mucho más sencillo de corregir que los sumideros, sin embargo puede tomar importancia en MDT's construidos con resolución vertical entera y con baja resolución horizontal. No se ha reportado en la literatura ninguna metodología distinta del azar para asignar dirección de drenaje en estas celdas. En este trabajo se propone una estrategia que tiene en cuenta la inercia del flujo que llega a la celda de dirección indeterminada.

3. DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO PARA LA CORRECCIÓN DE SUMIDEROS

La estrategia general del algoritmo, parte de un conjunto de sumideros ordenados por la altura, y para cada uno de los sumideros realiza un procedimiento de corrección que se describe a grandes rasgos a continuación. Primero se detecta la posibilidad de una corrección rápida dirigiendo el flujo hacia las celdas del borde del sumidero. Si esto no es posible, se explora toda la región que drena hacia el sumidero y allí se buscan las celdas apropiadas. En ambos casos, se debe decidir si el sumidero se corrige cortando o llenando, para esto, se evalúa la relación entre

el número de celdas afectadas por el llenado n_{ll} y las que serían cortadas n_c , y la altura total Δz de llenado. Si los valores de $n_{ll} \div n_c$ o Δz superan máximos especificados por el usuario, quiere decir que la corrección llenando es mucho más dañina para el MDT que la corrección cortando, en cuyo caso el sumidero se corrige cortando; en caso contrario se utiliza el algoritmo de llenado tradicional. En cualquier caso, el sumidero se convierte en una zona plana, la cual debe ser corregida.

Para una descripción detallada del algoritmo, es conveniente primero asignar notación para algunos objetos importantes. Llamaremos *marco* al objeto formado por las celdas de una porción rectangular del MDT. El objeto *sumidero* tendrá asociado un marco, una cota, un orden de aparición, y una variable booleana que marcará si ha sido corregido o no. Otro objeto importante es un vector global que almacena todos los sumideros que se detectan, a este vector lo denotaremos por VS . Por último, entenderemos por *borde* de un conjunto U de celdas, al conjunto formado por las celdas fuera de U y que son adyacentes a alguna celda de U .

La metodología central del algoritmo se orienta a la corrección de los sumideros y a la asignación de direcciones de drenaje en celdas con cota mayor que un valor z y que pertenezcan a un marco M , esta metodología se repite hasta que todos los sumideros de VS hayan sido corregidos. Se comienza haciendo el marco M igual a toda el área del MDT y z igual a la cota mínima del MDT. Los pasos subsiguientes se describen a continuación:

1. Se corrigen los pits y las zonas planas del marco M que tengan cota mayor que z . De esta manera se puede estimar direcciones de drenaje de todas las celdas que no pertenezcan a un sumidero.
2. Se buscan todos los sumideros de M y se

almacenan en el vector VS , organizándolos descendientemente por cota y por orden de aparición.

3. Sea S el primer sumidero de VS que no ha sido corregido. La corrección de S se hace siguiendo los pasos que se enumeran a continuación y que se ilustran en la figuras 3 y 4:
 - i. Con ayuda de las direcciones de drenaje, se extrae la cuenca de cada una de las celdas del borde de S . A la unión de estas cuencas se le llamará la cuenca del sumidero y se denotará por C_S . El marco de S se actualiza para que contenga a C_S .
 - ii. Para cada celda c_{BS} del borde del sumidero, se realiza una búsqueda para ubicar sus celdas adyacentes, que estén por fuera de S y que tengan cota menor que la de S . En caso de existir tales celdas, se escogen las de menor cota. Estas celdas se denotarán c_v 's y serán las candidatas a ser cortadas (ver Figura 3); su cantidad se denotará por n_c .
 - iii. Se cuenta el número de celdas de C_S que tienen cota menor que la de c_v . Este sería el número de celdas que se llenarían n_{ll} .
 - iv. Si $n_{ll} \div n_c$ o Dz superan los umbrales establecidos por el usuario, se decide cortar y la cota de la celda c_v se disminuye hasta la de S . En caso contrario se llena, esto es, a cada celda de C_S se le asigna el máximo entre su cota y la de c_v . A esta corrección, en la cual c_v tiene cota menor que S y es adyacente a S , se le llamará "corrección inmediata". S se marcó como corregido y se va al paso 4.
 - v. Si c_{BS} es una celda del borde de C_S , se buscan la celdas adyacentes a c_{BS} que no pertenezcan a C_S pero que tengan cota mayor que c_{BS} . Estas nuevas celdas son candidatas para ser cortadas, por tanto se incluyen en C_S y el marco de S se modifica para que las contenga (Figura 4a).

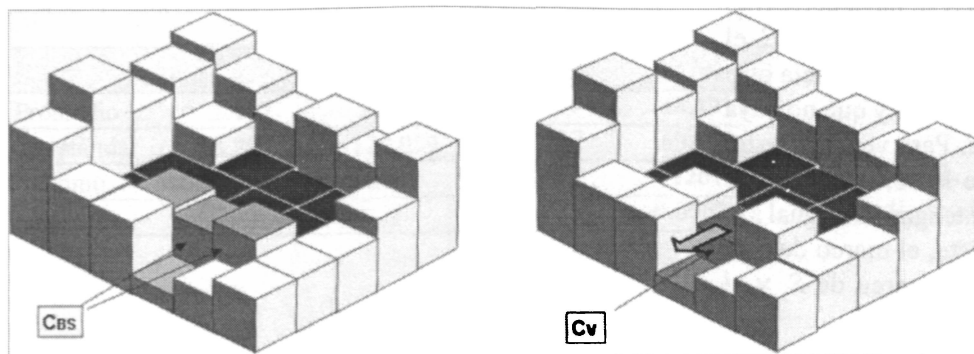


FIGURA 3.

Corrección de un sumidero cortando una celda de su frontera

- vi. La selección final de la celda c_v hacia la cual se dirigirá el flujo del sumidero, se hace entre las celdas del borde de C_s siguiendo los siguientes criterios sucesivos (Figura 4b,c y d):

Criterio 1. c_v debe tener la mínima cota entre las celdas del borde de C_s .

Criterio 2. para cada celda que satisfaga el criterio 1, se identifica la celda adyacente más baja. c_v debe tener la cota más baja de estas celdas. Denotemos esta celda por c_{AD} .

Criterio 3. la distancia entre c_v y el sumidero es la mínima entre las celdas que satisfacen el criterio 2.

- vii. Usando las direcciones de drenaje, se cuenta el número de celdas en la trayectoria desde c_v hasta el sumidero. Este sería el número de celdas que se cortarían n_c .

- viii. Se cuenta el número de celdas de C_s que tienen cota menor que la de c_v . Este sería el número de celdas que se llenarían n_l .

- ix. Se calcula el número n_l, n_c y el valor de Dz. Si se superan los umbrales establecidos por el usuario, quiere decir que la corrección llenando es mucho más dañina para el MDT que la corrección cortando, en cuyo caso el sumidero se corrige cortando.

- x. Si se decide cortar, defínase z_f como el mínimo entre la cota de S y la cota de c_{AD} . Luego se modifica la cota de las celdas en la trayectoria calculada en (v) hasta c_f . En el caso de que z_f sea mayor que la cota del sumidero, se debe realizar un llenado parcial. Para esto, a cada celda de C_s se le asigna como cota el máximo entre su cota y z_f (Figura 4e). El sumidero se marca como corregido.

- xii. Si se decide llenar, se define z_f como la cota de la celda c_v . Luego, a cada celda de C_s se le asigna como cota el máximo entre su cota y z_f . El sumidero se marca como corregido (Figura 4f).

1. En caso de que el sumidero S se haya corregido cortando y la cota z_f sea igual a la cota de S , el flujo de S podría estar siendo dirigido hacia otro sumidero S_2 de cota igual a la de S y que no haya sido corregido previamente. Para verificar esto, se realiza una búsqueda de la celda c_{AD} en los sumideros del vector VS que tengan cota igual a la de S . Si tal sumidero S_2 existe, el marco de S se amplía para que contenga al marco de S_2 y el sumidero S_2 se marca como corregido.
2. Se hace M igual al marco del sumidero y la cota z

igual a z_f . Se vuelve al paso 1.

Este algoritmo ha sido utilizado en muchos MDT's de diferentes procedencias, calidades y tamaños obteniendo muy buenos resultados. Ha probado resolver configuraciones complejas de sumideros y su tiempo de ejecución está controlado, primero por el número de sumideros en el MDT, y después por el tamaño del MDT. El algoritmo ha sido incorporado al módulo de análisis de modelos digitales de terreno del software HidroSIG Java.

4. RESULTADOS DEL ALGORITMO PARA LA CORRECCIÓN DE SUMIDEROS

Para evaluar los resultados del algoritmo descrito en la sección anterior, se realizó la corrección del MDT mostrado en la Figura 2 con varios umbrales para el valor de n_l, n_c y se calcularon estadísticos para determinar el daño producido por la corrección sobre el MDT. Este MDT presenta una cantidad especialmente grande de problemas y fue escogido para este análisis porque contiene sumideros de muchos tamaños y diversas procedencias, lo que permite obtener conclusiones relevantes para otros MDT's. En los acercamientos de la Figura 2 se pueden observar tres tipos de sumideros: pequeños sumideros ubicados siguiendo la dirección de los cauces, grandes sumideros alineados con los valles en las partes planas del MDT, y sumideros pequeños debidos a errores en la digitalización. Un primer conteo arroja un total de 843 sumideros.

En primer lugar se calcularon los valores de n_l, n_c y Dz para cada uno de los sumideros del MDT. Los resultados se resumen en la Tabla 1 y en la Figura 5 se muestra un histograma para n_l, n_c .

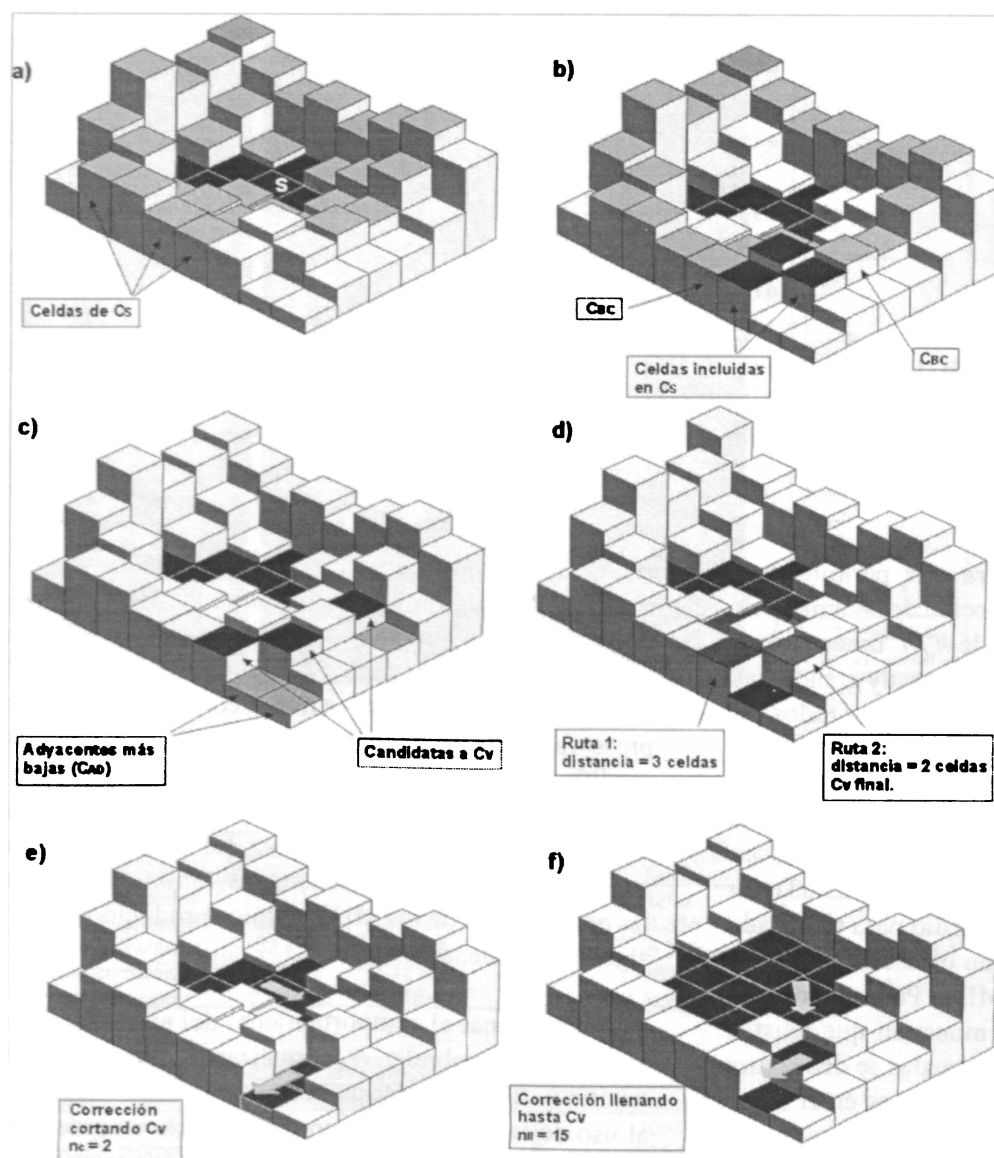
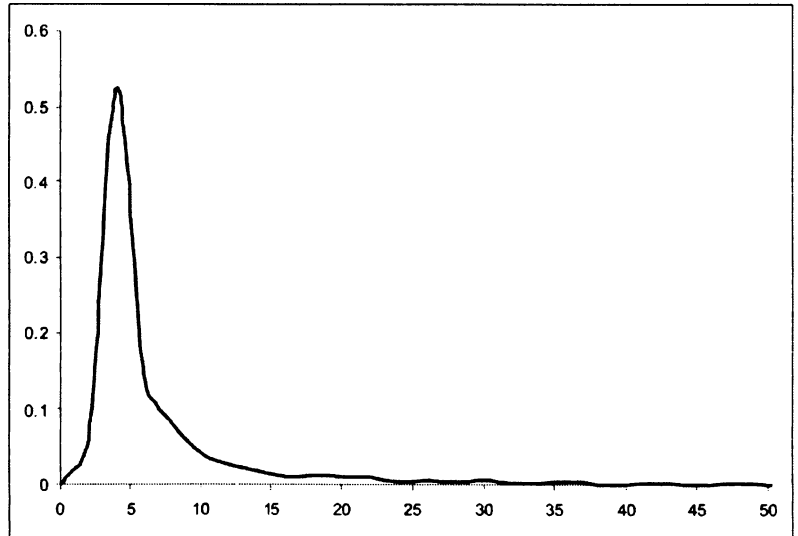


FIGURA 4.
Descripción gráfica de la corrección de un sumidero.

	n_c	n_{ll}	n_{ll}, n_c	Δ_z
Promedio	2.167	25.535	12.930	48.491
D. estándar	8.289	124.059	43.787	69.899
Máximo	221	2622	544	1261
Mínimo	1	3	1.3333	0.00024

TABLA 1.
Estadísticos para n_{ll} , n_c y $n_{ll} \div n_c$.

FIGURA 5.
Histograma calculado para n_{ll}, n_c , por encima del valor 50 se encuentra sólo el 3% de las ocurrencias.

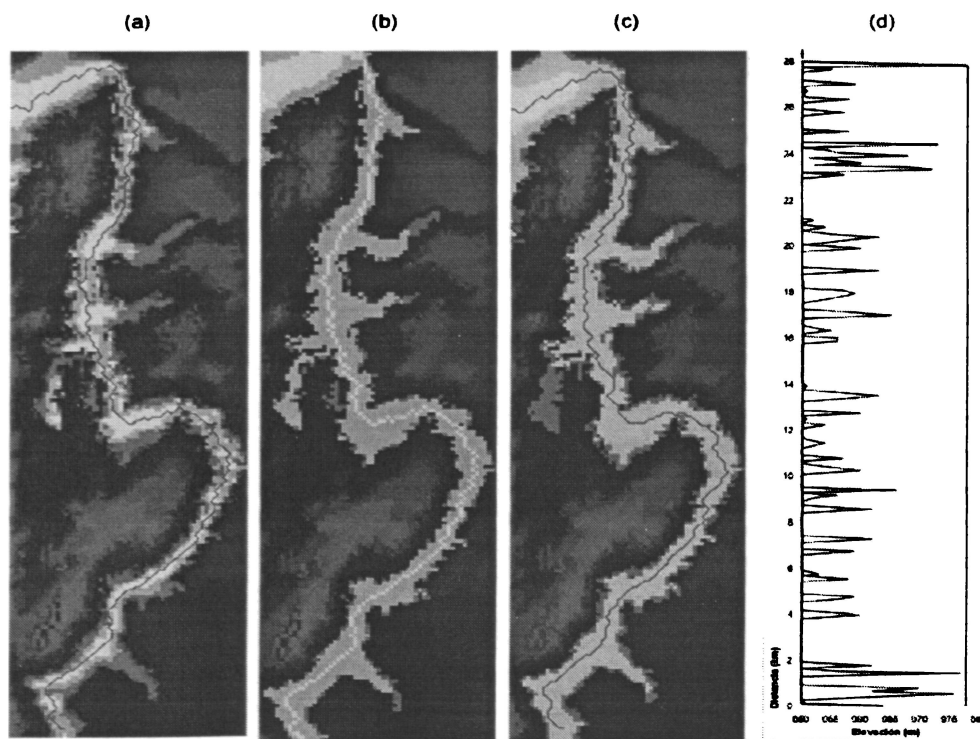


El valor promedio encontrado para n_{ll}, n_c permite tener un orden de magnitud para la selección de un umbral de corte adecuado. La distribución de n_{ll}, n_c muestra que, aunque n_{ll} y n_c toman valores en rangos muy grandes, su cociente es aproximadamente constante para todos los sumideros, y que se dan algunos casos con $n_{ll} \gg n_c$ en los cuales la selección del llenado es muy riesgosa. Se debe notar que, en promedio al menos, la corrección de un sumidero implica realizar modificaciones en relativamente pocas celdas ($n_c = 2.167$ y $n_f = 25.53$), sin embargo el valor de la altura promedio para el llenado de los sumideros $\ddot{A}z$ es apenas un orden de magnitud menor que las elevaciones del MDT. Por su parte, los valores extremos de $n_f, n_c, \ddot{A}z$, muestran que existen situaciones muy complejas, en las cuales se debe tener cuidado al afirmar que las modificaciones en el MDT son correcciones de errores en la elevación.

Para ilustrar la complejidad de algunas situaciones y el beneficio de la estrategia del cortado, considérese el sumidero para el cual $n_c = 221$, y cuyo n_f correspondiente es 997. A juzgar por el valor de n_c se podría decir que es totalmente inapropiado corregir el sumidero cortando. Este, sin embargo no es el caso. El sumidero está ubicado en el final del valle que se muestra en el acercamiento de la esquina superior izquierda de la figura Figura 2, y es el producto de las correcciones sucesivas sobre la gran cantidad de sumideros anidados que se encuentran siguiendo la trayectoria del río y que tienen la misma elevación. En la figura 6 se muestra un acercamiento sobre este sumidero en el MDT original, donde los círculos blancos muestran los extremos de la trayectoria

entre el sumidero y el vertedero detectado por el algoritmo. Las figuras b y c, muestran los MDT limpios producidos por ambas correcciones, y la figura c muestra el perfil del río que atraviesa el sumidero para cada uno de los tres MDT. Se observa que la corrección cortando preserva la cota de las celdas sobre la corriente, y realiza modificaciones aproximadamente 50% menores que el algoritmo de llenado en las celdas que rodean la trayectoria de la corriente. La presencia de configuraciones como las mostradas, limita gravemente las aplicaciones de los MDT limpios producidos por el algoritmo de llenado.

Para determinar el comportamiento del algoritmo ante cambios en el umbral n_{ll}, n_c , se realizaron corridas usando valores de 0 y ∞ para este umbral, los cuales corresponden al uso de la estrategia de corte y llenado en todos los sumideros respectivamente. Para ambos procesamientos, se registraron las correcciones individuales y netas de cada celda; las primeras se refieren al cambio en la elevación de la celda durante una corrección, y las correcciones netas incluyen todas las modificaciones realizadas en la cota de esa celda durante el procesamiento del MDT. Los resultados obtenidos se resumen en la tabla 2.


FIGURA 6.

Corrección de un sumidero complejo. (a) MDT original con la trayectoria real del agua, (b) MDT corregido después de aplicar la estrategia de sólo corte, (c) MDT corregido después con el algoritmo de llenado, (d) perfiles a lo largo de la trayectoria del agua, las líneas verde, roja y azul corresponden a los MDT a, b y c respectivamente.

umbral = 0	(a)			
	Corrección individual		Corrección neta	
	corta	llena	corta	llena
Celdas modificadas	1511	5194	993	4200
Corrección promedio	25.343	39.560	26.414	44.364
Desviación estándar	33.795	76.463	32.910	78.973
Máxima corrección	296	1211	296	1269.81
Mínima corrección	1.31E-07	1.31E-07	0.38	1.62E-08

umbral = ∞	(b)			
	Corrección individual		Corrección neta	
	corta	llena	corta	llena
Celdas modificadas	0	14659	0	10531
Corrección promedio	0	27.0799	0	39.511
Desviación estándar	0	54.7320	0	68.223
Máxima corrección	0	1261	0	1319.073
Mínima corrección	0	1.31E-07	0	0.00016

TABLA 2.

Comparación de resultados entre: (a) corrección cortando y (b) el algoritmo de llenado.

Durante la corrección cortando se llenan celdas cuando la celda más baja adyacente c_v al vertedero, tiene elevación superior a la cota del sumidero. Claramente, estas celdas son llenadas también cuando se utiliza el algoritmo de llenado. Sin embargo, el número de celdas llenadas por la corrección por corte es mucho menor que el número de celdas que se llenan cuando se usa el algoritmo de llenado tradicional. Más aún, el número total de celdas afectadas (993+4200) por la corrección

cortando es aproximadamente la mitad de todas las celdas llenadas en el algoritmo de llenado (10531). Además, la modificación promedio que se realiza en el corte de una celda es menor que la realizada en el llenado, tanto en la corrección individual como en la neta; de esta manera el cambio volumétrico total entre el MDT limpio y el MDT original es mucho menor para la corrección cortando que para la llenado.

5. ASIGNACIÓN DE LA DIRECCIÓN DE DRENAJE EN CELDAS INDETERMINADAS

Sea c una celda y supongamos que el número de direcciones para las cuales la pendiente es igual a la mínima es mayor o igual a dos, denotemos por d_i a tales direcciones plausibles. La celda c será entonces indeterminada. La idea de la metodología es incorporar la información de las celdas que drenan hacia c , y emular la inercia del flujo para tomar una decisión respecto a la dirección d_i más apropiada para c .

Sean c_1, \dots, c_n las celdas adyacentes a c cuyo drenaje está dirigido a c , y sean e_1, \dots, e_n sus respectivas direcciones de drenaje. Deseamos computar una dirección resultante del flujo que proviene desde las celdas c_k y usarla como estimativo de la dirección natural del flujo que sale de la

celda c . Para esto se puede definir una operación binaria \star que actúe sobre direcciones de drenaje y estime, simulando la suma vectorial, la dirección resultante de dos o más direcciones. Para que los resultados sean reproducibles, la operación \star debe ser conmutativa y asociativa. La operación propuesta acá se define en la figura 7, allí se listan los resultados para todas la combinaciones binarias de direcciones e_k .

Para determinar la dirección de drenaje de la celda c se comienza calculando $d = e_1 \star \dots \star e_n$. Si d es alguna de las direcciones plausibles, se toma d como la dirección de drenaje de c . Si este no es el caso, se asigna a c la dirección d_i más cercana a d . A pesar de lo elaborada que pueda parecer esta solución para un problema tan simple, la automatización de esta metodología es muy sencilla; en la Figura 8 se ilustra un ejemplo con dos de las posibles situaciones.

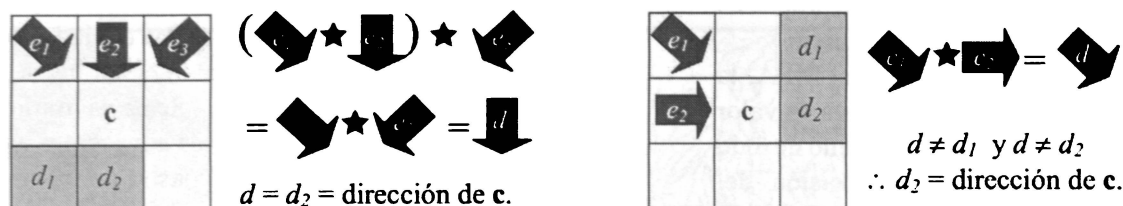
★	↖	↑	↗	←	●	→	↙	↓	↘
↖	↖	↖	↑	←	↖	↑	←	↙	●
↑	↖	↑	↗	↖	↑	↗	←	●	↗
↗	↑	↗	↗	↖	↗	↗	●	→	→
←	←	↖	↖	←	←	●	↙	↙	↓
●	↖	↑	↗	←	●	→	↙	↓	↘
→	↑	↗	↗	●	→	→	↘	↘	↘
↙	←	←	●	↙	↙	↘	↙	↙	↓
↓	↙	●	→	↙	↓	↘	↙	↓	↘
↘	●	↗	→	↓	↘	↘	↓	↘	↘

FIGURA 7.

Definición de la operación binaria \star para direcciones de drenaje.

Cuando la celda c se encuentre en el borde del MDT, o sea una celda costera, será también una celda indeterminada; en estos casos se puede refinar la metodología propuesta incorporando la información del área tributaria de las celdas c_1, \dots, c_n . Esto será posible sólo si se estima previamente la dirección de drenaje en

todas las celdas internas al MDT y se calculan sus respectivas áreas tributarias. Si este es el caso, la operación para determinar la dirección d , se hace entre las direcciones e_k correspondientes a las celdas c_k con área tributaria máxima.


FIGURA 8.

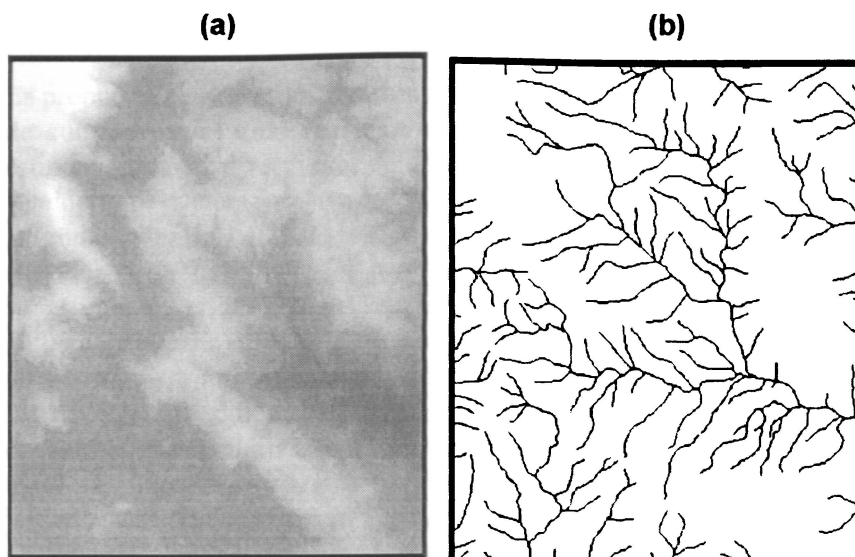
Ejemplos para la asignación de direcciones de drenaje en la celda indeterminada c .

6. EXTRACCIÓN DE DIRECCIONES DE DRENAJE A PARTIR DE LAS LÍNEAS AZULES

En esta parte se describe una metodología para incorporar la información de la red de drenaje real, o líneas azules, en la estimación automática de las direcciones de drenaje. Para implementar la metodología se requiere la siguiente información: primero, el MDT al cual se le quieren estimar las direcciones de drenaje; segundo, un modelo raster con valores de 1 en los pixeles correspondientes a las corrientes reales, y 0 en el resto. Este último mapa debe cubrir toda la zona del MDT y debe tener la misma resolución espacial del MDT. Al mapa de las corrientes le llamaremos un mapa de líneas azules, o simplemente MLA. La idea general, es realizar modificaciones en el MDT para forzar al modelo D8 a asignar direcciones de drenaje siguiendo el lineamiento de las corrientes del MLA. Luego se ajustan las modificaciones, de manera tal que sean las mínimas alteraciones del MDT necesarias

para que el flujo siga la dirección real. Esta metodología también resuelve el importante problema del delineamiento automático de la red de drenaje en MDT's, esto es, la separación entre las celdas que realmente son corrientes, y aquellas que pertenecen a las laderas.

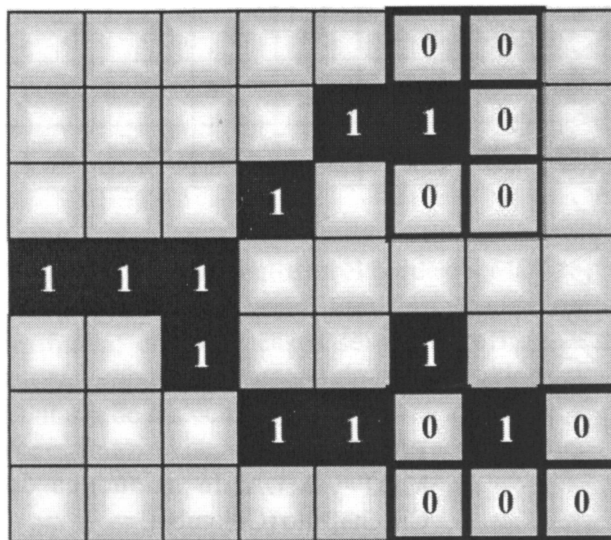
En la Figura 9, por ejemplo, se muestra un MDT y su correspondiente MLA de la cuenca del río Chachafruto en la Cordillera Occidental de los Andes Colombianos. La resolución horizontal del MDT es de 10 m y en total cubre un área de 13 km², los valores de la altura se encuentran en precisión doble y están ubicados entre 2200 y 2800 metros sobre el nivel del mar. Para que la metodología funcione exitosamente, se deben verificar dos cosas en el MLA: primero, que las corrientes que salen del mapa realmente lo hagan; y segundo, que no exista ninguna corriente que entre y salga del mapa, en un caso como estos, será imposible determinar la dirección del flujo a lo largo de la corriente.


FIGURA 9.

MDT y MLA de la cuenca del río Chachafruto (Colombia)

Los pasos de los cuales consta la metodología propuesta son muy sencillos, y se enumeran a continuación:

1. Si c es una celda con valor de 1 en el MLA, la cota de c en el MDT se disminuye hasta un valor z_R mayor que cero y menor que el mínimo de todo el MDT. A esto lo llamaremos una “incisión” del MDT, y su producto es una gran zona plana que sigue la forma de la red de drenaje.
2. Se corrigen las zonas planas y los sumideros del MDT. La corrección de las zonas planas se hace usando el algoritmo de Garbrecht y Martz (1997). Al usar este algoritmo, se logra que el flujo se aleje de las celdas altas circundantes y se dirija hacia la salida de la zona plana, que en este caso se ubica en la frontera del mapa.
3. Se estiman las direcciones de drenaje en el MDT.
4. Se detectan las celdas en donde inician las corrientes de la red de drenaje y se les restaura su cota original en el MDT. La detección de estas celdas se hace identificando patrones en forma de “U” de celdas con 0’s, alrededor de celdas del MLA que estén marcadas con 1’s y que únicamente reciban flujo de celdas marcadas con 0’s (ver Figura 10).
5. A partir de las celdas detectadas en 4, y usando las direcciones de drenaje estimadas en 3, se marcan las celdas en la trayectoria del flujo hasta las fronteras del MDT. Estas celdas constituyen la red de drenaje estimada a partir del mapa de líneas azules.
6. A cada una de las celdas que no fueron marcadas en el paso 5 y que fueron incisadas en el paso 1, se les restaura la cota original del MDT.



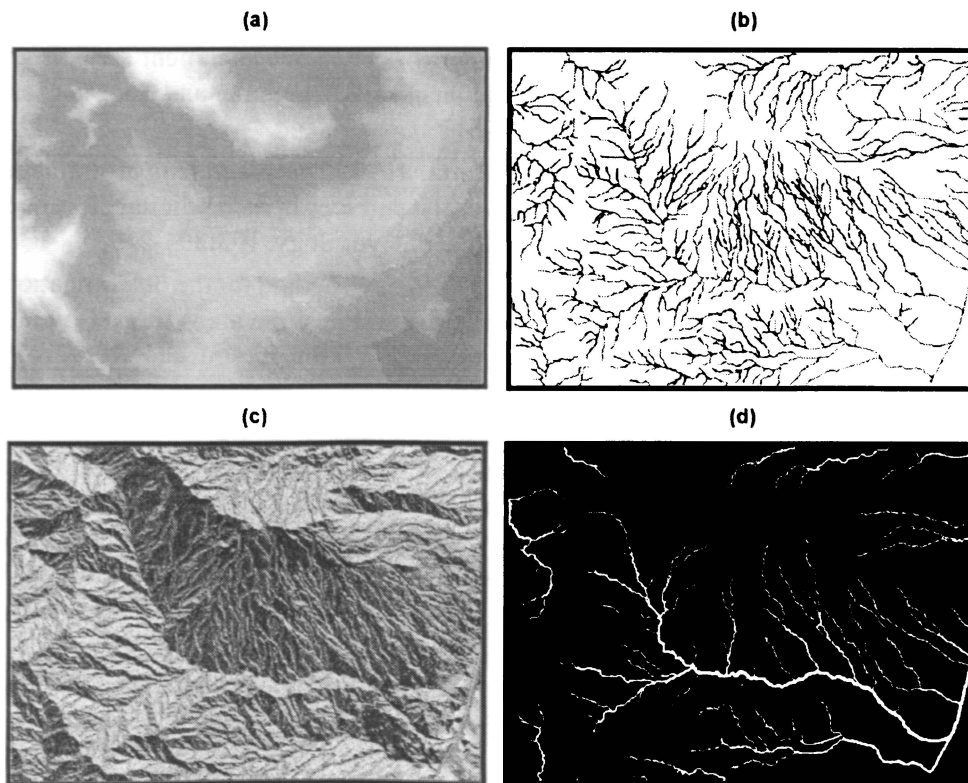
7. La restauración de la cota de las celdas marcadas en 5 se hace como sigue. Sea c_0 una celda inicial marcada en el paso 4 y sea c_1 la celda hacia la cual esta dirigido el flujo de c_0 . Sea z_1 la mínima cota entre las cotas de las celdas adyacentes a c_0 que no fueron marcadas en el paso 5. A c_1 se le asigna como cota el mínimo entre su cota original y $z_1 - dz$, donde dz es un número positivo del orden de magnitud de los incrementos usados en el algoritmo de corrección de zonas planas. Esta asignación garantiza que el flujo vaya en la dirección estimada en 3 y con la mínima alteración posible del MDT.

Excepto en casos en los cuales el MLA tenga problemas de ubicación sobre el terreno, o la resolución del MDT no permita representar adecuadamente la red de drenaje que se quiere estimar; este algoritmo garantiza una estimación exacta de las direcciones de drenaje en las celdas que hacen parte de la red de drenaje.

Un ejemplo de los resultados que se pueden obtener con esta metodología se muestra en la figura Figura 11. Aunque para este MDT, el MLA correspondiente fue construido con una red de drenaje mucho mas densa que la que la resolución del MDT permitiría estimar si la información de la red real se desconociera, la estimación con la metodología estimada arriba es exacta: las direcciones de drenaje están alineadas siguiendo las trayectorias reales de las corrientes y todas los canales consignados en el MLA fueron capturados en la red de drenaje estimada.

FIGURA 10.

Esquema para la detección automática de las cabezas de los canales a partir de un mapa de líneas azules.


FIGURA 11.

Resultados de la estimación de las direcciones y la red de drenaje usando un MDT, (a) MDT, (b) MLA, (c) matriz de las direcciones de drenaje, y (d) red de drenaje estimada.

7. CONCLUSIONES

Se proponen metodologías para la estimación automática de direcciones de drenaje en Modelo Digitales de Terreno, usando la estrategia de direccionamiento D8. Estas metodologías se implementaron en el software HydroSIG Java donde se puede hacer un mejor procesamiento del MDT, mejorando los parámetros geomorfológicos que se estiman con éste software; esto se ha probado exitosamente con distintos MDT

La propuesta central es un algoritmo para la corrección de sumideros, el cual realiza simultáneamente la estimación de las direcciones de drenaje y corrige los sumideros de manera sucesiva desde las zonas altas hasta las zonas bajas del MDT. Este algoritmo acepta que los sumideros pueden aparecer por sobreestimación o subestimación en las cotas de algunas celdas. De esta manera, para cada sumidero, detecta a cuáles celdas se les podría disminuir la cota para corregir el sumidero (corrección cortando); esta selección se hace con criterios encaminados a minimizar la intervención total sobre el MDT. El algoritmo además tiene implementado el tradicional “flooding algorithm” propuesto por Jenson y Domingue (1988), el cual consiste en corregir el sumidero

“llenando” todas sus celdas. La decisión de la mejor manera de proceder se toma según un umbral especificado por el usuario, el cual define cuándo la corrección llenando altera muchas más celdas que la corrección cortando. Se encuentra que el algoritmo maneja bien situaciones complejas, y que en la mayoría de los casos la corrección cortando es, en términos de intervención total sobre el MDT, la mejor forma de proceder.

Aunque el MDT escogido para evaluar el algoritmo es de calidad particularmente baja, las situaciones encontradas son muy comunes especialmente en los MDT contruidos a partir de curvas de nivel. Los resultados presentados permiten sacar algunas conclusiones de carácter general. Primero, que la suposición de que todos los sumideros son debidos a la subestimación de elevaciones, es falsa; y que el algoritmo de llenado puede alterar un MDT suficientemente para hacer del correspondiente MDT limpio inapropiado para muchas aplicaciones. Segundo, que la restricción de un máximo de dos celdas para cortar es muy limitante, máxime si se tienen en cuenta las situaciones complejas que se observan en los mapas interpolados y en las configuraciones que se generan durante el proceso de corrección. Tercero, que para realizar un procesamiento que equilibre las

correcciones cortando y llenando, se pueden usar umbrales de n_{ii} , n_c con valores entre 5 y 10, de manera que aquellos casos extremos en los cuales $n_{ii} \gg n_c$ se corrijan cortando. Por último, que existen algunos casos tan complejos e importantes para la estimación global de la configuración del drenaje, que hacen necesaria la implementación de un procedimiento semiautomático de corrección de sumideros que le permita al usuario tomar decisiones sobre la mejor forma de proceder.

Se introduce un criterio diferente del azar para estimar la dirección de drenaje en celdas que tienen varias direcciones igualmente factibles. El algoritmo presentado soluciona el problema incorporando criterios con sentido físico y sin agregar ninguna dificultad especial a la estimación de las direcciones de drenaje. Además se introduce una operación binaria entre direcciones de drenaje que emula la suma de vectores de flujo, y que puede ser útil en otras instancias del análisis de MDT's.

Por último, se propone una metodología para incorporar la información de la red de drenaje real en la estimación de las direcciones de drenaje. Esta metodología realiza modificaciones mínimas en el MDT, y logra una estimación exacta de las direcciones de drenaje en las celdas que pertenecen a la red. Además soluciona automáticamente y de manera precisa, el problema de la identificación de la posición de las cabezas de los canales.

8. BIBLIOGRAFIA

- Fairfield, P., y P. Leymarie. 1991. Drainage networks from grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 30(6):1681-1692.
- Martz, W. L., y J. Garbrecht. 1999. A outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM. *Computers and Geoscience*, 25 835-844.
- Band, L. 1986. Topographic partition of watersheds with digital elevation models. *Water Resources Research*, 22(1):15-24.
- Jenson, S y J. Domingue 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 54(11):1593-1600.
- Freeman, T. G. 1991. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Computer and Geosciences*, 17(3):413-422.
- Martz, L. W. y J. Garbrecht. 1992. Numerical definition of drainage networks and subcatchment areas from digital elevation models. *Computer and Geosciences*, 18(6):747-761.
- Garbrecht y Martz, 1997. The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models. *Journal of Hydrology*, 193:204-213.
- Tarboton, D. 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2):309-319.
- Vélez J. I., Mesa O. J., Poveda G., Borja A. F., Ramírez J. M., Hernández O. O., Urzola J. A., y Arias P. A. 2002. HidroSIG Java: Una Herramienta para la Visualización, Análisis y Estimación de información Hidrológica. *Memorias XV SEMINARIO NACIONAL DE HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA*, Medellín 29 - 31 de agosto de 2002.