

ARTÍCULO ORIGINAL

Análisis digital del terreno para la caracterización hidro-geomorfológica de la subcuenca V Aniversario, río Cuyaguaje

Digital Terrain Analysis for hydro-geomorphological characterization of V Anniversary subbasin, Cuyaguaje River

Ing. Abdiel Fernández, M.Sc. Gustavo Alonso

Universidad Agraria de La Habana, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba

RESUMEN: El Análisis Digital del Terreno (ADT) a partir de un Modelo Digital de Elevaciones (DEM) ha ganado auge con la revolución informática. De modo que, en la actualidad un gran número de software SIG cuentan con herramientas para este análisis en la esfera hidrológica. La obtención adecuada de la red de drenaje mediante el análisis digital del terreno (ADT), es un prerequisite esencial para la modelación eficiente de los procesos hidro-geomorfológicos a escala de cuenca. Existe una gran gama de métodos para ADT, de los cuales una cantidad limitada (métodos estándar) están implementados sobre plataforma SIG siendo los más populares, no así con otros métodos más avanzados. El objetivo general del presente trabajo es establecer una metodología para la modelación hidrogeomorfológicas de redes de drenaje en la subcuenca hidrográfica V Aniversario perteneciente a la cuenca del Río Cuyaguaje. Se compararon varias combinaciones de métodos estándar y avanzados, atendiendo al tratamiento de depresiones del DEM, determinación de la dirección del flujo y métodos de extracción de red fluvial. Los resultados del trabajo mostraron como la combinación de métodos de dirección de flujo simple con el modelo Curvature/Drop Analysis de obtención de red de drenaje, permite la diferenciación espacial de la densidad de drenaje y delinear así, de forma más precisa, la red fluvial de la región seleccionada.

Palabras clave: ADT, dirección de flujo, red de drenaje, SIG, DEM.

ABSTRACT: Digital Terrain Analysis (ADT) from a Digital Elevation Model (DEM) has gained momentum with the information revolution. So, at present a large number of GIS software have tools for this analysis in the area hydrology. Obtaining adequate drainage network using digital terrain analysis (DTA), is an essential prerequisite for efficient modeling of hydro-geomorphological processes at basin scale. A wide range of methods to ADT, of which a limited number (standard methods) are implemented on GIS platform being the most popular, but not with other more advanced methods. The overall goal of this work is to establish a methodology for modeling hydro-geomorphological drainage networks in the sub-basin V Anniversary owned Cuyaguaje River Basin. We compared various combinations of standard and advanced methods, response to treatment of DEM depressions, determining the direction of flow and extraction methods river network. The results of the study showed as methods combining simple flow direction with the model Curvature/Drop Analysis for obtaining drainage network, allows differentiation spatial density and delineate drainage well, more precisely, the fluvial of the selected region.

Keywords: ADT, flow direction, drainage, GIS, DEM.

INTRODUCCIÓN

La caracterización automática de la red de drenaje es un paso preliminar necesario para la modelación digital de procesos hidrológicos y geomorfológicos. Aun cuando existen notables intentos de representar los canales fluviales usando Redes Triangulares Irregulares (TINs) (Palacios-Velez & Cuevas-Renaud, 1986; Gandoy-Bernasconi & Palacios-

Velez, 1990; Jones *et al.*, 1990; Nelson *et al.*, 1994; Braun & Sambridge, 1997). O implementando índices morfológicos para la simulación hidrogeomorfológica (Peucker & Douglas, 1975; Toriwaki & Fukumura, 1978; Band, 1986; Tribe, 1992). La mayoría de los procedimientos de identificación de redes de canales están basados en estimación de la dirección de flujo usando Modelos Digitales de Elevación (DEM, siglas

en inglés) (O'Callaghan & Mark, 1984; Jenson & Domingue, 1988; Tarboton & Ames, 2001).

El incremento de las posibilidades computacionales, así como de los métodos de obtención de DEM con mayor resolución y calidad, ha llevado a la comunidad científica a desarrollar y perfeccionar los métodos y modelos para el análisis digital del terreno sobre modelos raster (Wilson & Gallant, 2000). En la actualidad un gran número de herramientas han sido implementadas y ampliamente difundidas con dicho fin en software SIG. Sin embargo, otras herramientas más avanzadas no son tan populares y requiere de mayor atención. De modo que en el presente trabajo se plantea como objetivo general establecer una metodología para la modelación hidrogeomorfológicas de redes de drenaje en la subcuenca hidrográfica V Aniversario de la cuenca del Río Cuyaguatete en la provincia Pinar del Río. Para ello se seleccionaron dos métodos de corrección de DEM, tres métodos de determinación de dirección de flujo y dos modelos para la obtención de redes de drenaje. La mencionada

región es seleccionada por las características particulares de su geomorfología, dentro de lo que se cuentan los mogotes con sus pendientes abruptas, que pueden generar dificultad a los modelos para la interpretación.

MÉTODOS

La región de estudio está comprendida dentro de la cuenca del Río Cuyaguatete, ubicada en la provincia de Pinar del Río, (Norte 22°02'47"–22°35'37" Oeste 83°49'14"–84°08'27") con una superficie de 723 km² por lo cual es la mayor de la provincia y de la región occidental de Cuba. Uno de los cierres hidrográficos naturales de esta cuenca es la subcuenca V Aniversario (estación hidrométrica), la cual abarca parte de los municipios Viñales y Minas de Matahambre con una extensión de 150 km² (ubicación: 22°24'6" – 22°35'40" Latitud Norte, 83°47'55" – 83°56'9" Longitud Oeste). El área de interés se muestra en la Figura 1. (CTCH, 2000).

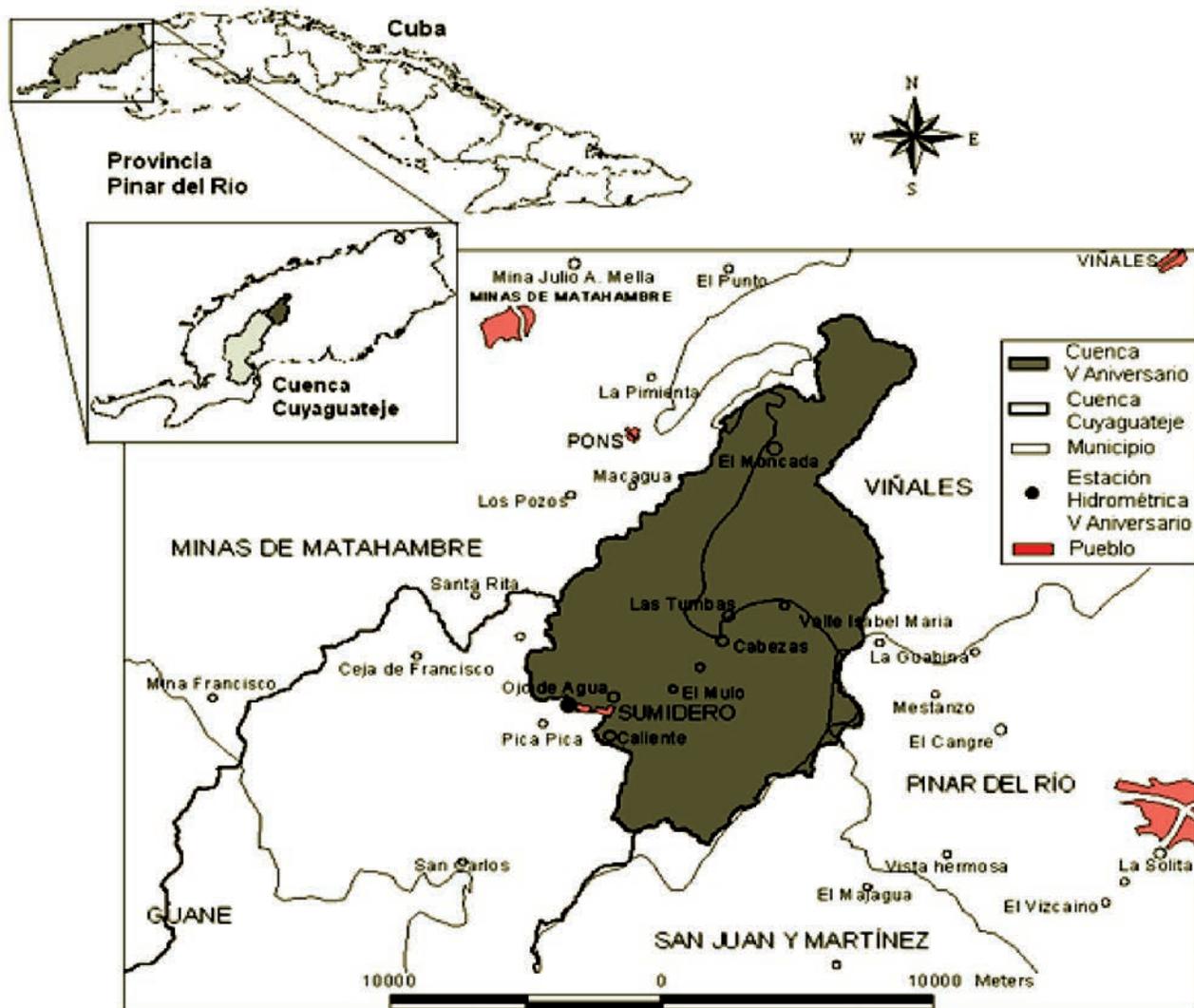


FIGURA 1. Ubicación geográfica de la subcuenca V Aniversario, perteneciente a la cuenca del Río Cuyaguatete.

La variación anual de la temperatura de la región de estudio es típica para los trópicos, con un valor medio de 25,1 °C, los límites máximo 27,7 °C (julio y agosto) y mínimo 22 °C (enero), además de una humedad relativa de aproximadamente 80%. El

régimen de las precipitaciones se divide en un periodo seco (noviembre-abril) y húmedo (mayo-Octubre), la precipitación anual es 1 770 mm, con un valor máximo de 270 mm en los meses de agosto-septiembre y mínimo de 45 mm en diciembre (Alonso, 2008).

La zona montañosa, que comprende toda la cordillera de Guaniguanico, es la más antigua de la cuenca, su aparición se remonta al período Jurásico de la era Mesozoica, ejemplo la formación San Cayetano (Jurásico Inferior o Medio). Otras zonas se formaron en el período Neógeno y Cuaternario. En estas zonas es abundante el contenido de rocas de diferentes tipos, formas y tamaños, que están en relación directa con los procesos primarios y secundarios que han sufrido los materiales mineralógicos desde su formación a la actualidad. Las rocas más características de la zona son: Areniscas, Esquistos, Pizarras y Serpentinatas. Después le siguen las sedimentarias como las Calizas y las Margas, por último las rocas ígneas como las Tobas (MINAG, 1984).

El relieve de la cuenca está formado por las montañas calcificadas de la Sierra de los Órganos, los denominados mogotes, las cuales alcanzan alturas hasta 590 m. Al norte y al sur de esta sierra se encuentran las denominadas premontañas o alturas de pizarras las cuales no sobrepasan los 400 m, en casi toda su extensión cubierta por pinares. Entre las pizarras y las sierras se encierran los valles intramontanos o llanuras cársicas marginales.

Modelo Digital de Elevaciones

El Modelo Digital de Elevaciones empleado fue obtenido a partir de la digitalización de curvas de nivel y sus atributos en hojas cartográficas de la región a escala 1:25000. Con los puntos digitalizados se realizó una interpolación en el software "IDRISI" versión 32.2, aplicando el método de Redes Triangulares Irregulares (TIN, siglas en inglés). Específicamente el procedimiento de triangulación restringida de Delaunay (Eastman, 2001), derivando en un DEM de 25 m de resolución.

Métodos de corrección del DEM

Independientemente de los métodos de obtención, los modelos digitales de elevaciones contienen puntos o regiones más bajos que las celdas que lo rodean (huecos o depresiones), así como áreas planas (pendiente cero). Estos elementos, que pueden ser representaciones fieles del terreno o errores en el

proceso de obtención del DEM, que en ambos casos dificultan el análisis digital del terreno, especialmente, al aplicar modelos de determinación de dirección de flujo de aguas superficiales y de obtención de redes de drenaje en una determinada región o cuenca. Esta dificultad es independiente de la resolución para estudios de hidrogeología morfológica (comúnmente pixel de 20-30 m). Ha sido demostrado que incluso en los DEM obtenidos de LIDAR, donde la resolución suele ser menor en un orden de magnitud, la aplicación de los más recientes modelos hidrológicos puede devolver resultados incorrectos, de no ser adecuadamente tratada la eliminación de depresiones y áreas planas (Petroselli, 2012).

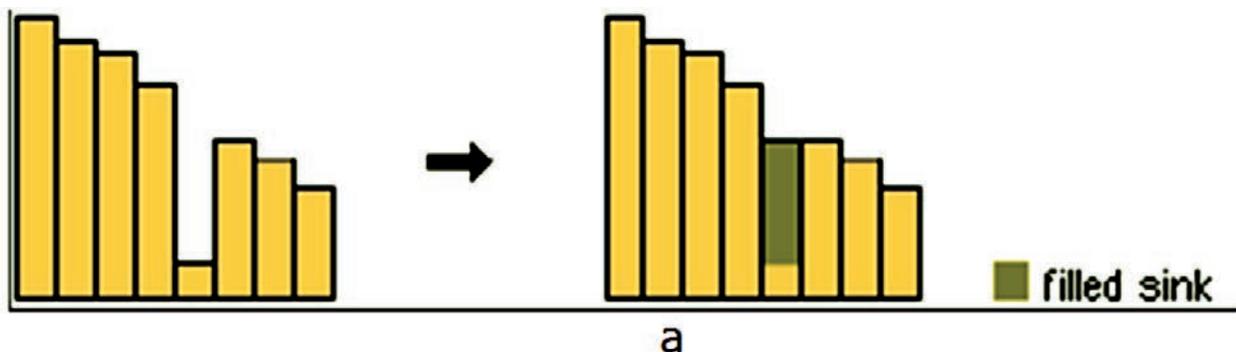
Existen diversos métodos de rellenado de DEM, el más comúnmente usados se conoce como *Filling o Flooding* (rellenado o inundado) (Jenson & Domingue, 1988) y ha sido implementado en software SIG, como por ejemplo el software libre GRASS, que contienen paquetes para análisis del terreno. Este método consiste en elevar la altura del hueco o depresión hasta el valor del más bajo de los vecinos que lo rodea (Figura 2a). Como resultado se eliminan las depresiones pero se genera mayor porcentaje de superficies planas como ilustra la figura (Temme *et al.*, 2006).

Otro de los métodos empleados para eliminar depresiones y áreas planas es el PEM4PIT (Physical Erosion Model for PIT filling, siglas en inglés) (Grimaldi *et al.*, 2007) (Figura 2b). En este la altura de la depresión es ajustada a través de un modelo de equilibrio del relieve representado por la siguiente ecuación:

$$O = U - \beta A^\theta S + D \nabla^2 z$$

donde: U explica los movimientos geológicos, $\beta A^\theta S$ es el término de incisión de canales, S es la máxima pendiente en la dirección del canal, A es el área acumulativa en una celda específica, θ es el parámetro de relación pendiente-área y β representa la erodibilidad, la cual está relacionada con la litología, $\nabla^2 z$ es la curvatura y D difusión de la zona de pendiente.

Se debe destacar que mientras el "filling" crea mayor porcentaje de áreas planas, el PEM4PIT genera pendientes naturales en concordancia con los procesos físicos y las propiedades físicas del terreno representados en los parámetros β , θ y D de la ecuación (Nardi *et al.*, 2008). A pesar de esto, se debe señalar que este método tiende a una mayor transformación del relieve, especialmente en regiones de saltos muy abruptos.



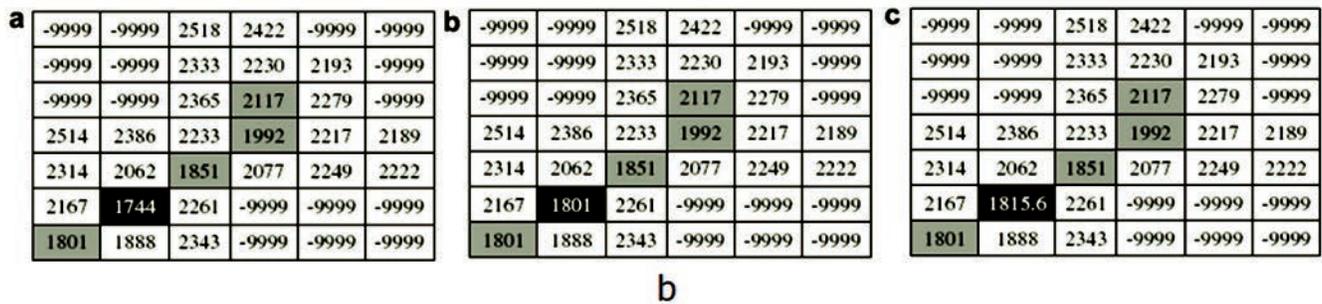


FIGURA 2. a) Perfil lateral de una depresión antes y después de aplicar el “Filling”. b) Ejemplo de rellenado aplicando “PEM4PIT”.

A estos métodos *Filling* y PEM4PIT se les ha denominado en la literatura como “estándar” y “avanzado” respectivamente (Petroselli & Fernández, 2012).

Para el análisis digital del terreno realizado a la cuenca V Aniversario se llevó a cabo la corrección del DEM. En este caso fueron aplicados los dos métodos cuyos resultados serán discutidos posteriormente.

Métodos de dirección de flujo

Otro paso en la descripción hidrogeomorfológica es la asignación de la dirección del flujo superficial. En los software SIG han sido implementados diversos métodos, los más simples denominados Dirección de Flujo Simple (SFD - Single Flow Direction, siglas en Inglés) (O’Callaghan & Mark, 1984; Jenson & Domingue, 1988; Fairfield & Leymarie, 1991; Costa-

Cabral & Burges, 1994; Garbrecht & Martz, 1997; Orlandini *et al.*, 2003) 2007), los cuales asignan a la masa de agua que pasa por una celda del DEM dirección de flujo en el sentido de uno solo de sus ocho vecinos. Otros más complejos denominados Dirección de Flujo Múltiple (MFD - Multi Flow Direction, siglas en Inglés) (Freeman, 1991; Quinn *et al.*, 1991; Lea, 1992; Costa-Cabral & Burges, 1994; Holmgren, 1994; Quinn *et al.*, 1995; Tarboton, 1997; Pilesjo *et al.*, 1998; Lindsay, 2003; Seibert & McGlynn, 2007), distribuyen el flujo de una celda a uno o varios de sus vecinos de acuerdo a las características del terreno y el algoritmo implementado. Este paso está estrechamente relacionado con las correcciones al DEM, especialmente por las áreas planas donde los algoritmos devuelven falsos cursos de agua tales como líneas paralelas. En el presente trabajo se emplearon dos métodos SFD y un MFD.

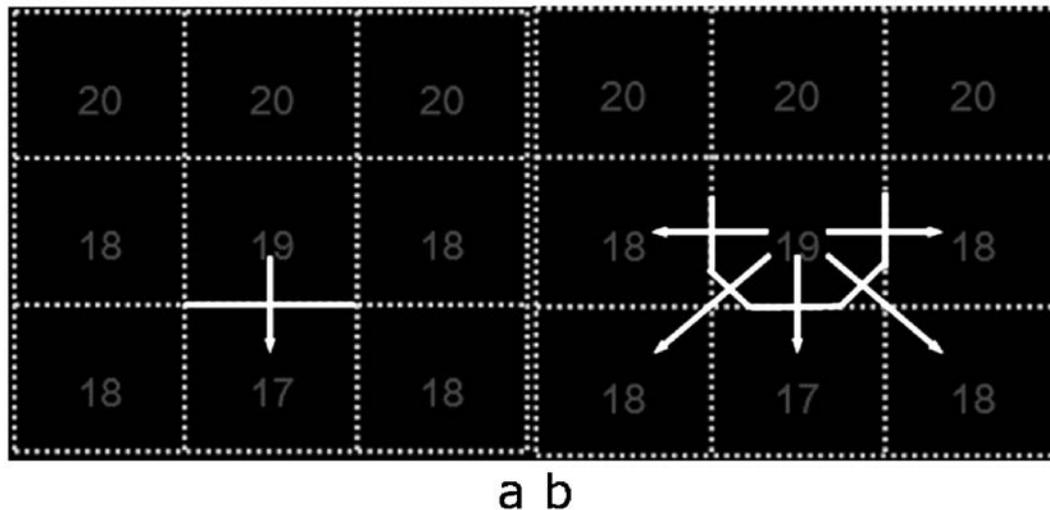


Figura 3: Representación del esquema básico de trabajo: a) SFD y b) MFD.

El método SFD más simple, es el denominado D8 (O’Callaghan & Mark, 1984) (Figura 3a), donde el algoritmo estudia cada celda del DEM a partir de una cuadrícula de 3 x 3 celdas, para asignar una única dirección de flujo en sentido de pendiente descendente a la celda central a partir de analizar la altura de los 8 vecinos (Figura 3a). Se hace evidente que este algoritmo no interpreta correctamente las regiones de pendiente cero.

El segundo método SFD empleado fue el D8-LTD (Least Transversal Deviation, Orlandini *et al.*, 2003). En este caso la dirección de flujo es asignada estableciendo primeramente una Dirección de Flujo Teórica (TFD, siglas en inglés) que corresponderá a una de las 8 caras triangulares que forman los centros de una celda dada y el de sus 8 vecinos (Figura 4). A partir de ahí se realiza el análisis de la dirección de flujo comparando las desviaciones transversales entre las direcciones cardinal y transversal con la dirección teórica dentro de la cara dada. El elemento fundamental que agrega este método es el factor λ , que indica el porcentaje de influencia que ejercerá la memoria de los resultados de los pasos anteriores. Dicho factor puede

tomar valores entre 0 (ninguna memoria, coincide con el D8) y 1 (memoria completa). Para el presente trabajo se consideró $\lambda = 1$. Nardi *et al.* (2008), concluye que el patrón de red de drenaje obtenido con este método tiende a ser el más cercano a la red digitalizada.

Por otra parte, se empleó el método MFD de Tarboton (1997), denominado D-infinity o simplemente $D\infty$, donde se considera la dirección de flujo en relación a la TFD, estimada

también por el método de ocho caras triangulares adyacentes (Figura 4). La dirección de flujo se determina por la medida angular, expresada en radianes, entre la dirección cardinal este y la TFD. Los ángulos formados entre la TFD y las direcciones cardinal y diagonal de la cara correspondiente determinarán que porcentaje de flujo corresponde a cada una de las dos celdas receptoras. En este modelo, la dispersión es minimizada dividiendo el flujo entre dos celdas como máximo.

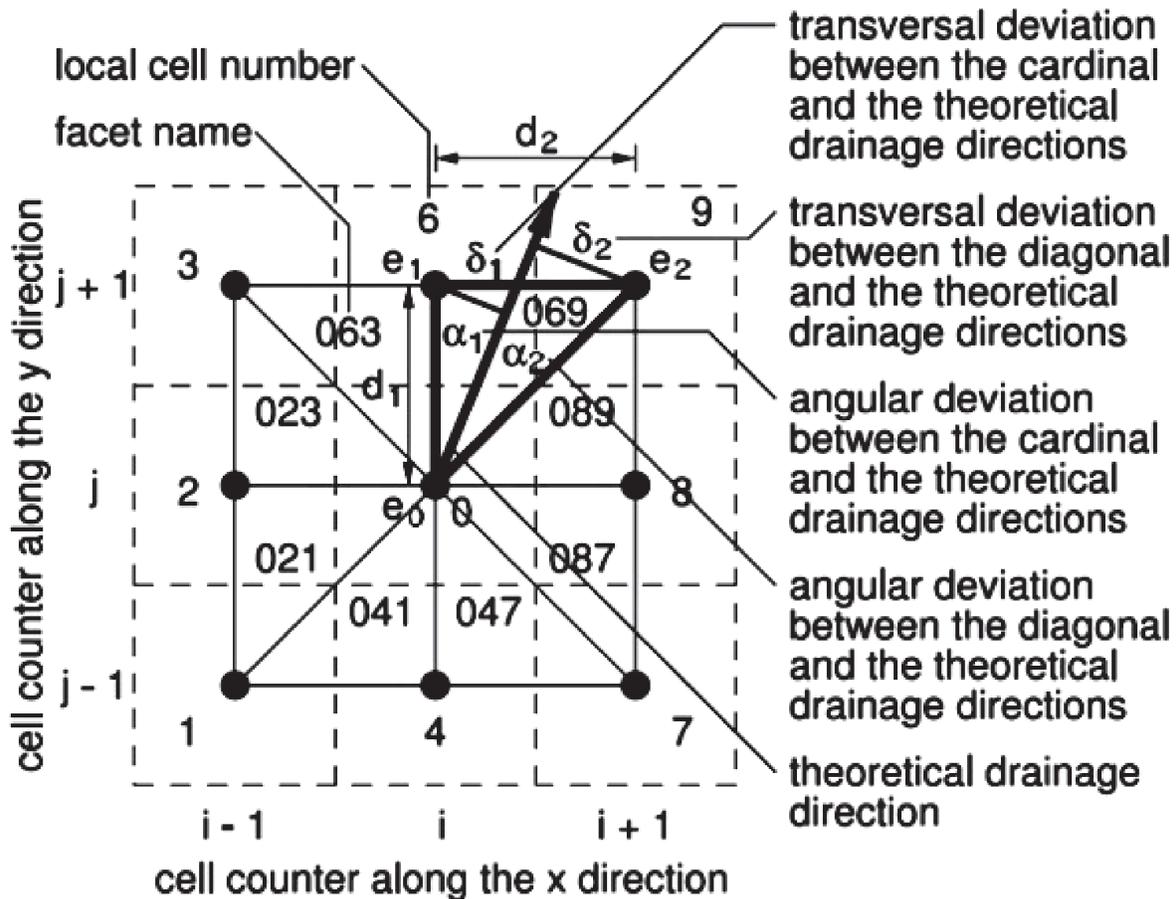


FIGURA 4. Esquema y ecuación del método de dirección de flujo simple D8-LTD.

Métodos de modelación de redes de drenaje

La red de drenaje constituye la base de los procesos de modelación hidrológica. Diversos han sido los esfuerzos para establecer modelos que permitan su obtención. Entre estos podemos mencionar el *Area Threshold* (AThr) (O'Callaghan & Mark, 1984). Este está basado en el área de drenaje acumulativa, estableciendo un umbral a partir del cual una celda se considera inicio de un canal, y consecuentemente toda celda de mayor área de drenaje acumulado (expresado en unidades cuadradas del mapa) sería parte del canal, conformando así la red de drenaje. Este método tiene la deficiencia de no considerar las peculiaridades geomorfológicas de las distintas relaciones pendiente-área de una cuenca, al utilizar un valor límite, que en cualquier caso, es establecido por el investigador. Para este límite se suele emplear 1 km^2 expresado en unidades cuadradas del mapa. Los resultados demuestran que este método no interpreta

adecuadamente las áreas planas o de pendiente cero, dibujando cursos de agua paralelos (Petroselli & Fernández, 2012).

Otro método empleado con bastante frecuencia en la delineación de redes de drenaje es el *Curvature/Drop Analysis* (C/DA) (Tarboton *et al.*, 1991; Tarboton & Ames 2001). Este también considera un límite de área acumulativa para establecer el inicio de los canales, pero a diferencia del AThr, dicho límite se optimiza estadísticamente. Otro elemento que se tiene en cuenta, es la construcción de la red con la estructura geomorfológica de la región, determinando por comparación de alturas en una ventana de 2×2 celdas, los pixel de menor altura, por donde se debe formar el canal. Posteriormente, se selecciona, el menor valor de área acumulativa, a partir del cual se forman canales, tales que, la altura media del canal de un orden determinado, no sea significativamente superior a la altura media del canal del orden siguiente. Las diferencias entre

las alturas medias de los canales se comparan aplicando una prueba estadística de t de Student. De este modo, a partir de tener en cuenta las características físicas de la red, el modelado devuelve redes complejas y de densidad de canales que se ajustan a la geomorfología de la región, siendo capaz de diferenciar espacialmente la densidad de canales.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la corrección del DEM, como paso inicial del análisis hidrogeomorfológico de la cuenca V Aniversario, fueron empleados el método *Filling* y el *PEM4PIT*. Derivado de la aplicación del método *Filling* (Figura 5a) se rellenaron aproximadamente 7 km² que representan el 4,6% de la superficie de la cuenca. Sin embargo, este procedimiento generó pequeñas áreas de pendiente nula (<4% del área total) que no estaban contenidas en el DEM original, que aunque no resulta significativa a nivel de cuenca, pueden producir malas interpretaciones de los modelos de dirección de flujo en estas áreas. Contrariamente, la aplicación del *PEM4PIT* demostró que el modelo no interpreta adecuadamente la geomorfología de la región, transformando un área de 71,6 km² que representa el 47% de la cuenca (Figura 5b). A pesar de no generar áreas de pendiente nula, por lo significativo del área transformada este resultado no es viable para continuar con el análisis digital del terreno en este caso de estudio. Como consecuencia se decidió aplicar el resto de

la metodología sólo al DEM rellenado con el método estándar.

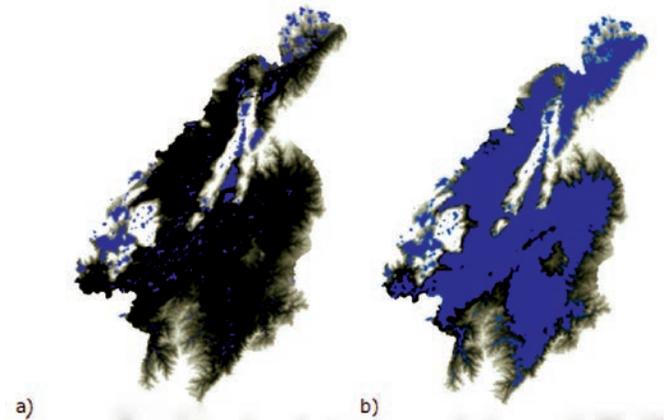


FIGURA 5. Áreas transformadas por los métodos de corrección de DEM: a) *Filling* b) *PEM4PIT*.

Es necesario destacar el hecho de que el *PEM4PIT* no interpreta correctamente la geomorfología de la región. Este resultado puede estar explicado porque los parámetros de la ecuación del modelo no conciben formaciones de relieve tan particulares como los mogotes y sus cambios abruptos de pendiente. Sin embargo, se ha demostrado que para el análisis de zonas llanas resulta muy eficiente por la peculiaridad de eliminar las áreas de pendiente nula (Petroselli & Fernández, 2012).

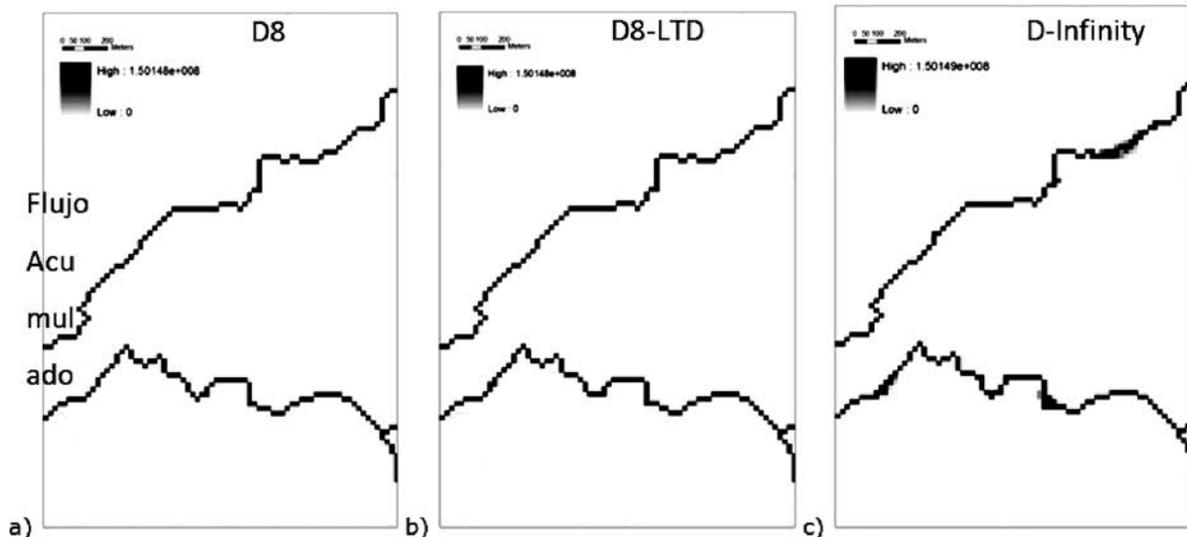


FIGURA 6. Resultados de los tres métodos aplicados para determinar la dirección de flujo.

Del análisis de las imágenes (Figura 6) se puede apreciar, como el método MFD empleado (D-Infinity), genera áreas de dispersión dentro de algunas zonas de máxima acumulación, donde se espera una mayor concentración del flujo. Este comportamiento se corresponde con la esencia del método, a pesar de que entre los MFD es el que genera menor dispersión, distribuyendo el flujo sólo a dos celdas. Dicho resultado constituye una dificultad para la obtención de la red de drenaje más precisa, necesaria por ejemplo, con fines de gestión de riesgo de desastres y planificación. Por esta razón, para el presente trabajo se descarta el uso de MFD, sin demeritar en ninguna medida su utilidad para otros trabajos en el campo de la hidrología, como los estudios de lluvia y escurrimiento.

Valorando los principios de los SFD empleados, D8 y D8-LTD. El segundo método se puede considerar una mejora del primero, donde se agrega el factor λ , que representa la influencia del resultado de los pasos anteriores para la asignación de la dirección de flujo a una celda determinada. Este elemento es de mayor utilidad en las regiones de pendiente nula, donde se dificulta la asignación de la dirección de flujo. El relieve de la cuenca V Aniversario denota pequeñas áreas planas, donde, en un

análisis visual, se pudo apreciar que los resultados del método D8-LTD permitieron modelar canales más sinuosos, contrario al D8 que sólo permitió representar líneas paralelas en estas áreas. Considerando además resultados de trabajos anteriores (Nardi *et al.*, 2008; Petroselli & Fernández, 2012), donde ha predominado el método D8-LTD, para el presente trabajo se considera preferente este, en la obtención de la red de drenaje.

La utilización de diferentes modelos de obtención de red de drenaje, constituye un paso determinante en la calidad de los estudios hidrológicos. A continuación se comparan los resultados de los métodos AThr (con área umbral de 0,16 km²) y C/DA. Para la aplicación del AThr se seleccionó como umbral, un valor tal que generara la coincidencia de los canales principales de la simulación con los de la red digitalizada.

Cómo elementos comparativos se tomaron la extensión del máximo canal, el orden de la red según el método de clasificación de Strahler, la longitud de los canales y densidad por órdenes y total. Estos indicadores permiten distinguir la red de mayor desarrollo, así como la que mejor se corresponde con las características geomorfológicas de la región, característica que se evidencia, cuando la red muestra una distribución espacial no uniforme de la densidad de los canales.

De la Tabla 1 se puede apreciar la diferencia entre los resultados de la aplicación de los métodos AThr y C/DA evidenciando la eficiencia de la obtención automática del límite de área acumulativa a partir del cual se considera el inicio del canal. La red obtenida es de un orden de Strahler mayor, así como de mayor longitud el canal principal.

TABLA 1. Características generales de las redes de drenaje obtenidas

Métodos	Area Threshold. km ²	Orden de Strahler	Longitud del max. canal (km)
Area Threshold	0,16	5	25,935
Curvature/Drop Analysis	-	6	25,984

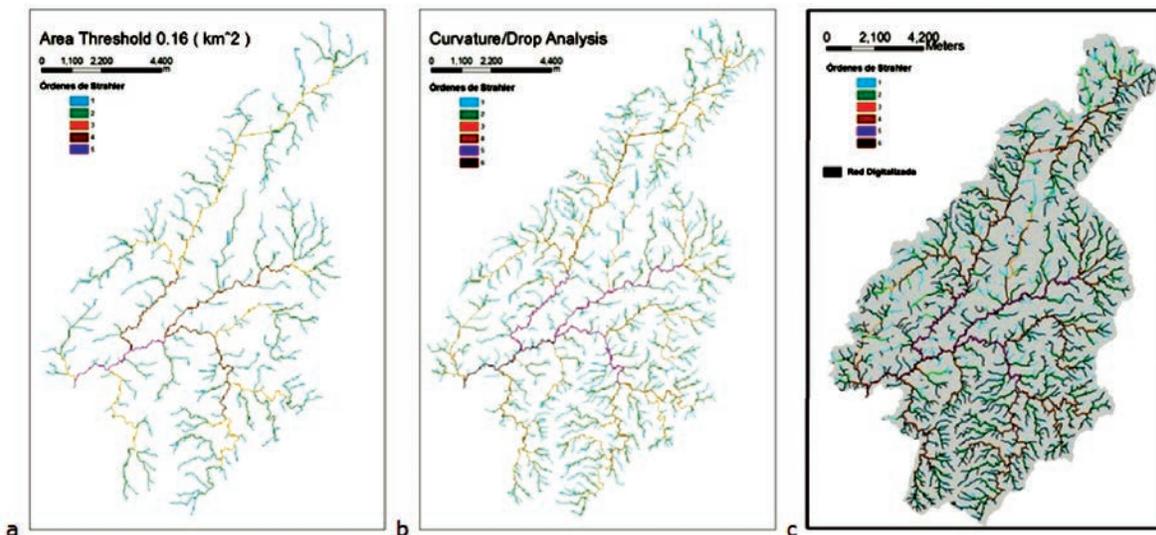


FIGURA 8. Redes obtenidas de la aplicación de los métodos a) AThr (umbral 0,16 km²); b) C/DA c) Resultado de la superposición de la red digitalizada con la red obtenida con C/DA.

La Figura 8 muestra las redes obtenidas y la comparación entre la red modelada con el método C/DA y la red digitalizada (Figura 8c), apreciándose la similitud entre estas, con mayor precisión en los canales de mayor orden. Es bueno destacar que las dos redes tienen el mismo orden y desarrollos muy similares en cuanto a longitud de los canales principales y distribución espacial de la densidad de canales.

Otro elemento a tener en cuenta es el resultado de los modelos en las áreas de pendiente cero, donde es visible que se generan cursos de agua irreales, representados por líneas paralelas. La red obtenida por el método C/DA, a pesar de contener también líneas paralelas, muestra cómo el método es capaz de interpretar mejor con estas regiones, consiguiendo mayor cantidad de canales, así como algunos canales sinuosos y no paralelos en los límites de las áreas planas.

Tabla 2. Longitud de canales por orden de Strahler y longitud total de canales de la red

Métodos	Area Threshold	Longitud de canales por orden de Strahler, m					Longitud total de canales, m
		1	2	3	4	5	
Area Threshold	0,16	132 901	71 802	36 560	20 878	5 803	267 944
Curvature/Drop Analysis	-	221 458	116 199	56 285	35 152	19 086	453 983

TABLA 3. Densidad de canales por orden de Strahler y densidad total de canales de la red

Métodos		Densidad de canales por orden de Strahler, m/m ²						Densidad Total
		1	2	3	4	5	6	
Area Threshold, km ²	0,16	0,000886	0,000478	0,000243	0,0001391	3,869E-05		0,0017863
Curvature/Drop Analysis		0,001476	0,00077	0,000375	0,0002343	0,000127	3,869E-05	0,0030266

Las Tablas 2 y 3 ilustran cuantitativamente las diferencias visuales de los mapas de red de drenaje. Véase, como los resultados de longitud de los tres canales de mayor orden son similares, enfatizándose la diferencia en los canales de orden 1 y 2. Se puede apreciar que longitud y la densidad total de canales obtenidas del método Area Threshold representa el 0,59 del resultado del método Curvature/Drop Analysis, demostrando la obtención de una red considerablemente más compleja con este último método. Análisis similares se pueden realizar respecto a las longitudes y densidades de los canales por órdenes, justificando en todos los casos la preferencia por el método Curvature/Drop Analysis sobre el Area Threshold para la obtención de una red de canales más compleja.

CONCLUSIONES

- La modelación de redes de drenaje que describan lo más adecuadamente posible la hidro-geomorfología del terreno es un paso esencial en los estudios hidrológicos y sus múltiples aplicaciones. Con el objetivo general de comparar algunas de las herramientas implementadas en SIG para la modelación de redes de drenaje se desarrolló el presente trabajo. En particular, se compararon los resultados de la aplicación de varias de las herramientas más comúnmente utilizadas y

otras más avanzadas, en la modelación de la red de drenaje de la subcuenca V Aniversario de la cuenca del río Cuyaguaje en la provincia Pinar de Río. Con interés particular en analizar cómo responden las distintas herramientas en el estudio de esta región geomorfológicamente peculiar: (I) se aplicaron dos métodos de corrección del DEM para remover depresiones, denominados *Filling* y PEM4PIT, (II) se analizaron los resultados de tres métodos de dirección de flujo y por último (III) se emplearon dos métodos de modelación de redes de drenaje AThr y C/DA. Los resultados demostraron que:

- El método de corrección *Filling*, interpreta mejor las formas peculiares del relieve de la región de estudio, como las pendientes abruptas de los mogotes, rellenando sólo pequeñas áreas para permitir la continuidad del flujo.
- El método MFD D-Infinity, potencia la dispersión en los canales, dificultando la delineación acertada de la red de drenaje. Los métodos más adecuados para la región son los no dispersivos o SFD, particularmente el D8 y D8-LTD, preferentemente el segundo por sus posibilidades para trabajar con áreas de pendiente cero.
- El método C/DA permite modelar una red compleja y logra distribuir espacialmente la densidad de canales, adecuándose a la geomorfología de la región.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, G.: *Estimación del riesgo de erosión hídrica en la subcuenca V Aniversario del río Cuyaguaje*, Tesis (en opción al título de **Máster en Ciencias del Suelo**), Universidad Agraria de La Habana, Cuba, 2008.

BAND, L. E.: "Topographic partition of watersheds with digital elevation models", *Water Resour. Res.*, 22(1): 15–24, 1986.

BRAUN, J. & M. SAMBRIDGE: "Modelling landscape evolution on geological time scales: a new method based on irregular spatial discretization", *Basin Res.*, 9: 27–52, 1997.

CTCH: *Catálogo de Cuencas Hidrográficas Río Cuyaguaje*, Ed. Consejo Territorial de Cuencas Hidrográficas de Pinar del Río (CTCH), Pinar del Río, Cuba, 2000.

COSTA-CABRAL, M. C. & J. BURGÉS: "Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas". *Water Resour. Res.* 30(6): 1681–1692, 1994.

FAIRFIELD, J. & P. LEYMARIE: "Drainage networks from grid digital elevation models" *Water Resour. Res.*, 27: 709–717, 1991.

FERNANDEZ, N. F & E. DIETRICH: "Hillslope evolution by diffusive processes: the timescale for equilibrium adjustments", *Water Resour. Res.*, 33(6): 1307–1318, 1997.

FREEMAN, T. G.: "Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid", *Comput. Geosci.* 17: 413–422, 1991.

GANDOY-BERNASCONI, W. & L. PALACIOS-VELEZ: "Automatic cascade numbering of unit elements in distributed hydrological models", *J. Hydrol.*, 112: 375–393, 1990.

GARBRECHT, J. & W. MARTZ: "The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models", *J. Hydrol.*, 193: 204–213, 1997.

- GRIMALDI, S., F. NARDI, F. DI BENEDETTO, E. INSTANBULLUOGLU & L. BRAS: "A physically based method for removing pits in digital elevation models", *Adv. Water Resources*. 30: 2115-2158, 2007.
- JENSON, S. K. & O. DOMINGUE: "Extracting topographic structure from digital elevation models", *Photogramm. Engng Remote Sensing* 54: 1593-1600, 1988.
- JONES, N. L., G. WRIGHT & R. MAIDMENT: "Watershed delineation with triangle-based terrain models" *J. Hydraul. Div. ASCE*, 116(10): 1232-1251, 1990.
- LINDSAY, J. B.: "A physically based model for calculating contributing area on hillslopes and along valley bottoms" doi: 10.1029/2003WR002576, *Water Resour. Res.*, 39(12): 1332, 2003.
- NARDI, F., S. GRIMALDI, M. SANTINI, A. PETROSELLI & L. UBERTINI: "Hydrogeomorphic properties of simulated drainage patterns using DEMs: the flat area issue", *Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques*, 53(6): 1176-1192, December 2008.
- NELSON, E. J., L. JONES & W. MILLER: "Algorithm for precise drainage-basin delineation", *J. Hydraul. Engng.*, 120(3): 298-312, 1994.
- O'CALLAGHAN, J. F., & D.M. MARK: "The extraction of drainage networks from digital elevation data", *Comput. Vision Graphics Image Process.*, 28: 323-344, 1984.
- ORLANDINI, S., G. MORETTI, M. FRANCHINI, B. ALDIGHERI, & B. TESTA: "Path-based methods for the determination of nondispersive drainage directions in grid-based digital elevation models", doi:10.1029/2002WR001639, *Water Resour. Res.*, 39(6): 1144, 2003.
- PALACIOS-VELEZ, O. L. & B. CUEVAS-RENAUD: "Automated river-course, ridge and basin delineation from digital elevation data", *J. Hydrol.* 86: 299-314, 1986.
- PETROSELLI, A. & A. FERNÁNDEZ: "The Flat-Area Issue in Digital Elevation Models and Its Consequences for Rainfall-Runoff Modeling" DOI 10.2747/1548-1603.49.5.711, *GIScience & Remote Sensing*, 49(5): 711-734, 2012.
- PETROSELLI, A.: "LIDAR Data and Hydrological Applications at the Basin Scale", DOI 10.2747/1548-1603.49.1.139, *GIScience and Remote Sensing*, 49(1): 139-162, 2012.
- PEUKER, T. K. & H. DOUGLAS: "Detection of surface-specific points by local parallel processing of discrete terrain elevation data", *Comput. Graphics Image Processing*, 4: 375-387, 1975.
- QUINN, P., BEVEN K. J., CHEVALLIER P. & O. PLANCHON: "The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models", *Hydrol. Processes* 5: 59-79, 1991.
- QUINN, P., J. BEVEN & R. LAMB: "The $\ln(a/\tan B)$ index: how to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework", *Hydrol. Processes*, 9: 161-182, 1995.
- SEIBERT, J. & B. L. MCGLYNN: A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models, W04501. doi: 0.1029/2006WR005128. *Water Resour. Res.* 43: 2007.
- TARBOTON, D. G. & P. AMES: *Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data*. In: *World Water and Environmental Resources Congress* (Orlando, Florida, 20-24 May). Am. Soc. Civil Engrs, USA, 2001.
- TARBOTON, D. G.: "A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models", *Water Resour. Res.* 33: 309-319, 1997.
- TARBOTON, D. G., L. BRAS & I. RODRÍGUEZ-ITURBE: "On the extraction of channel networks from digital elevation data", *Hydrol. Processes*, 5(1): 81-100, 1991.
- TEMME A.J.A.M., M. SCHOORL & A. VELDKAMP: "Algorithm for Dealing with Depressions in Dynamic Landscape Evolution Models", *Computers and Geosciences*, 32: 452-461, 2006.
- TORIWAKI, J. & T. FUKUMURA: "Extraction of structural information from grey pictures", *Comput. Graphics Image Processing*, 7(1), 30-51, 1978.
- TRIBE, A.: "Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid elevation models: a review and a new method", *J. Hydrol.* 139: 263-293, 1992.

Recibido: 02 de octubre de 2011 / **Aprobado:** 22 de diciembre de 2012

Abdiel Fernández Álvarez, profesor, Universidad Agraria de La Habana, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba, Correo electrónico: abdiel_alvarez@isch.edu.cu
Nota: La mención de marcas comerciales de equipos, instrumentos o materiales específicos obedece a propósitos de identificación, no existiendo ningún compromiso promocional con relación a los mismos, ni por los autores ni por el editor.