

## Métrica para avaliação da inconsistência hidrológica de terrenos representados por MDE

Guilherme Tiganá Gonçalves Moreira <sup>1</sup>  
Thiago Luange Gomes<sup>1</sup>  
Marcus Vinicius Alvim Andrade <sup>1</sup>  
Carlos Antônio Alvares Soares Ribeiro <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Informática – Universidade Federal de Viçosa (UFV)  
36.570-000 – Viçosa – MG – Brasil  
guilhermetigana@yahoo.com.br, thiagoluange@gmail.com, marcus@dpi.ufv.br

<sup>2</sup> Departamento de Engenharia Florestal – Universidade Federal de Viçosa (UFV)  
36.570-000 – Viçosa – MG – Brasil  
cribeiro@ufv.br

**Abstract.** This paper presents a method to evaluate the hydrologic inconsistencies in terrain represented by digital elevation model. The method compares the drainage network automatically obtained from the terrain with a reference network. The differences obtained are quantified to determine the difference between the two networks. Basically, the network evaluation consists in comparing the corresponding rivers to compute the differences in the river length, direction, mouth, etc. The rivers correspondence is determined based on the otto codification which classifies the rivers using numeric codes based on some characteristics such as the drainage area, the river length, etc.

**Keywords:** Otto codification, drainage network, DEM Otto codificação, rede de drenagem, MDE

### 1. Introdução

Os avanços tecnológicos na coleta de dados têm permitido a obtenção de um enorme volume de informações sobre a superfície terrestre. Estes dados têm sido processados por sistemas de informação geográfica (SIG) para diversas aplicações como hidrografia (DANNER et al., 2007), posicionamento de recursos como torres de celulares (BESPAMYATNIKH et al., 2001; ANDRADE et al., 2009) ou vigias (FRANKLIN; VOGT, 2006), planejamento de rotas de transporte (TRACY et al., 2008), etc. Dentre as várias formas de representação dos dados de um terreno este trabalho supõe que esses dados estarão representados por um modelo digital de elevação (MDE), isto é, uma matriz de elevação representa o terreno por uma matriz que contém a elevação de pontos amostrados de forma regular.

No caso de aplicações envolvendo hidrografia, uma questão importante é a consistência hidrográfica do MDE. Isto é, para que a extração automática das características hidrográficas seja uma alternativa viável aos métodos tradicionais de obtenção manual dessas informações é essencial que não exista discordância entre a hidrografia mapeada "manualmente" (na verdade, obtida por digitalização de mapas e levantamentos de campo) e o trajeto de escoamento superficial derivado numericamente. Em geral, o processamento automático dos MDEs com frequência se depara com situações que impedem a determinação da direção de escoamento contínuo até o ponto de deságüe da bacia analisada. Por exemplo, a ocorrência de depressões espúrias ou de regiões planas inviabilizam a correta delimitação da área de contribuição à montante do ponto de interesse, comprometendo todas as demais etapas do estudo. O problema torna-se ainda mais acentuado em regiões de planície, onde a informação altimétrica não é suficientemente detalhada para caracterizar corretamente a calha do curso d'água. Esse é, especificamente, o caso da Bacia Amazônica.

O objetivo deste trabalho é apresentar uma métrica que permita avaliar as possíveis

inconsistências hidrológicas de um MDE. Mais precisamente, uma métrica que permita quantificar a inconsistência possibilitando que o usuário possa decidir se ele deve (ou não) aplicar os métodos para o ajustamento do modelo para torná-lo menos inconsistente. É importante observar que a execução destes métodos de ajustamento é bastante demorada e, em geral, somente estão disponíveis em SIGs avançados e de custo elevado como por exemplo, o ArcGIS.

## 2. Metodologia de Trabalho

O elemento básico da hidrografia de um terreno é a sua rede de drenagem que é composta pela direção do fluxo de escoamento e pelo fluxo acumulado em cada ponto (célula) do terreno. Um outro componente importante da rede de drenagem é a bacia de contribuição que é composta por todos os pontos do terreno que seguindo as direções de fluxo escoam para um mesmo ponto (a foz) da bacia. Há diversos métodos para a obtenção da rede de drenagem (CHAVES, 2002).

Uma das principais dificuldades no uso dos MDEs na área de hidrologia é a discordância entre o traçado da hidrografia mapeada e o trajeto de escoamento superficial derivado numericamente. Veja figura 1.

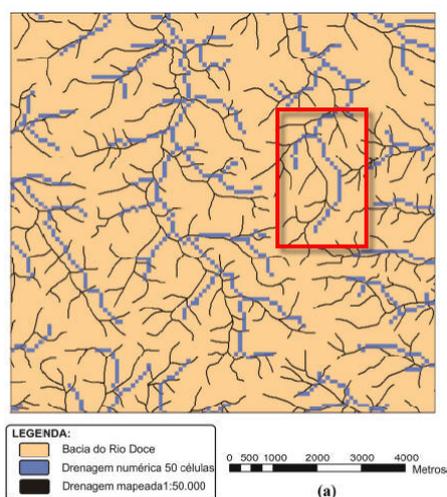


Figura 1: Exemplo de inconsistências hidrológicas.

Para contornar estas deficiências, há alguns métodos que visam obter determinadas características hidrográficas tratando as inconsistências de maneira específica como (LOPES; SANTOS, 2008; WALKER; WILLGOOSE, Jul. 1999) enquanto outros métodos se propõem a gerar modelos digitais de elevação hidrológicamente consistentes (MDEHC) (CHAVES, 2002; VOGT; COLOMBO; BERTOLO, 2003). Em geral estes métodos se baseiam na remoção das depressões, no uso de pontos de apoio de campo e no uso da drenagem como base de auxílio para a confecção da TIN. O processo de geração de um MDEHC é bastante dispendioso do ponto de vista de tempo pois envolve o processamento iterativo de grandes MDEs. Este processo fica ainda mais demorado quando os MDEs são excessivamente grandes para serem armazenadas na memória principal do computador exigindo assim o processamento dos dados em disco, o que torna o processo proibitivamente longo.

A idéia básica do método para verificar as inconsistências consiste em comparar a rede de drenagem computada a partir de um MDE com a rede de drenagem conhecida desse terreno. Esse processo de verificação se baseia em associar os rios correspondentes e, como descrito a seguir, essa tarefa não é trivial. Para realizar essa associação o método proposto nesse trabalho

apoiar-se no processo de codificação hidrográfica desenvolvido por Otto Pfafstetter, conhecido como otto-codificação (PFAFSTETTER, 1989).

## 2.1. Sistema de otto-codificação

No sistema de endereçamento proposto por Otto Pfafstetter, a importância de qualquer rio está diretamente relacionada à área de sua bacia hidrográfica. A otto-codificação destaca-se pela representação da estruturação inerentemente recursiva das bacias hidrográficas, por meio de utilização de códigos. Para tanto, faz uso de um sistema decimal de numeração, a fim de estabelecer uma relação topológica entre cada par de segmentos ou entre um segmento e a respectiva foz da rede. Quanto maior o valor do código do tributário analisado, mais distante ele estará da foz do curso principal ao qual ele se conecta diretamente. Conseqüentemente, para dois tributários de um mesmo curso principal, aquele que tiver o código de maior valor estará mais próximo da nascente do rio principal. Há, ainda, uma distinção entre os dígitos pares e ímpares de um código, permitindo-se saber se o segmento pertence ou não ao curso principal. Assim como descrito por Teixeira e outros (TEIXEIRA et al., 2007), a codificação de Otto Pfafstetter se baseia nos seguintes princípios e podem ser melhor compreendido através da Figura 2:

- O curso d'água principal de uma bacia é sempre o que tem a maior área de contribuição a montante;
- A partir da identificação do curso d'água principal, codificam-se suas bacias afluentes por área de contribuição;
- As quatro bacias maiores recebem códigos pares que são atribuídos de jusante a montante: a bacia mais a jusante é a de código 2, a bacia imediatamente a montante desta recebe o código 4, a próxima recebe o código 6 e a mais a montante de todas, 8; e
- As interbacias recebem códigos ímpares, sendo a da foz a número 1, a interbacia entre as bacias 2 e 4 recebe o valor 3, e assim por diante, até a última bacia de montante, que recebe o número 9.

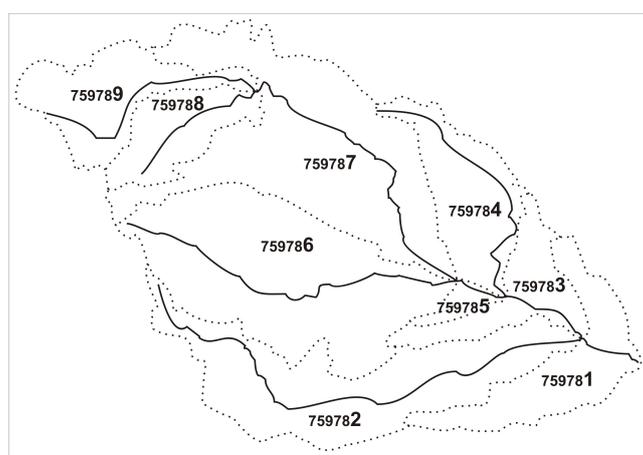


Figura 2: Exemplo de codificação de bacia do rio Itaúnas, prefixo 75978 (TEIXEIRA et al., 2007).

Uma importante vantagem dessa estratégia é o uso inteligente e eficiente de dígitos: utilizam-se menos dígitos que os sistemas similares usuais, e os códigos são infinitamente replicáveis, i.e., não se impõem quaisquer restrições ao número de dígitos necessários para

endereçar, de maneira única, qualquer segmento da rede de drenagem, independentemente do nível de detalhamento desta rede ou de sua abrangência (FURNAS; OLIVEIRA, 2001). No sistema de otto-codificação original, a diferenciação entre rio principal e tributário é feita usando-se a respectiva área de drenagem como variável de decisão. Assim, em qualquer confluência o rio principal é aquele que possui a maior área de drenagem nos dois segmentos analisados.

## 2.2. Sistema de otto-codificação modificado

No sistema original proposto por Pfafstetter tanto a rede hidrográfica quanto a área drenada por cada segmento devem ser conhecidas ou determinadas para se definirem os quatro maiores tributários do curso principal, isso pode trazer algumas dificuldades para o processo de codificação. Para evitar essas dificuldades, Silva e outros (SILVA et al., 2008) propuseram um sistema que utiliza somente o comprimento dos tributários como variável de decisão. Isso elimina o considerável ônus da obtenção de dados de altimetria e da geração de MDEs, imprescindíveis à obtenção acurada das áreas de drenagem, que delongam, sobremaneira - e algumas vezes até mesmo impedem -, a condução do processo de endereçamento. Esse sistema de otto-codificação modificado carrega em si todas as vantagens do modelo original e permite a sua utilização para codificação hidrográfica.

## 3. Métrica para avaliação das inconsistências hidrológica

Dado um terreno  $T$  representado por uma MDE, as inconsistências hidrológicas em  $T$  serão avaliadas comparando-se a rede de drenagem  $D_T$  computada a partir de  $T$  com uma rede de drenagem de referência  $D_R$  que é suposta ser a rede condizente com a realidade. As diferenças identificadas serão utilizadas pela métrica para definir o valor das inconsistências.

A primeira etapa no processo é determinar as associações entre os rios que formam as duas redes, isto é, quais rios serão comparados entre si. Esta associação não é trivial, pois podem ocorrer alterações no posicionamento e no comprimento dos rios ou até mesmo, alguns rios podem não aparecer na rede a ser avaliada. Por exemplo, veja a Figura 3 onde tais situações são ilustradas.

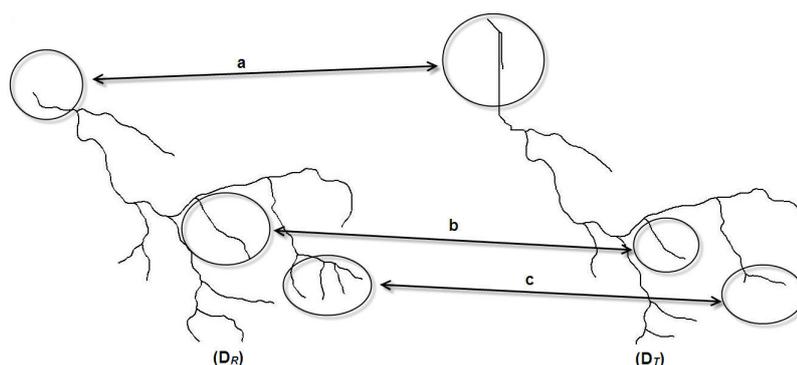


Figura 3: Exemplos de diferença entre bacias (a) Posição da foz, (b) comprimento do afluente e (c) afluentes que existem em uma rede, mas não em outra.

Nesta proposta, a associação é realizada utilizando a otto-codificação (FURNAS; OLIVEIRA, 2001; SILVA et al., 2008). Assim, dadas as duas redes de drenagem, a computada  $D_T$  e a de referência  $D_R$ , a idéia básica é realizar a otto-codificação (versão adaptada) dessas duas redes e fazer a associação dos rios utilizando os códigos obtidos. No entanto, devido às diferenças (inconsistências) entre as duas redes, os códigos gerados podem ser bastante diferentes, mesmo em redes simples. Por exemplo, veja a Figura 4, onde a alteração do comprimento dos afluentes

(a) e (b) influencia na escolha dos quatro maiores tributários que determina divisão das inter-bacias.

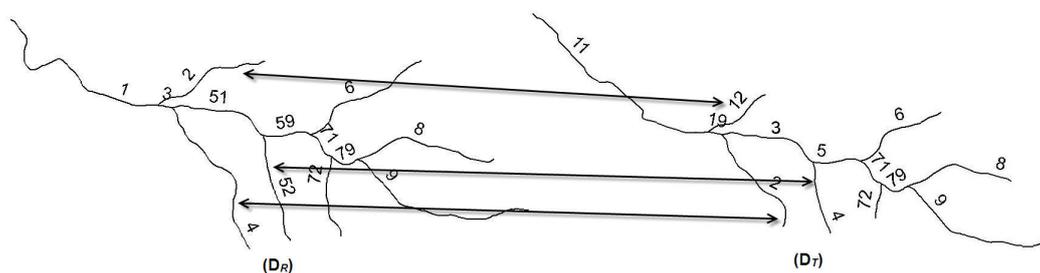


Figura 4: Diferença entre os códigos otto dos afluentes associados entre si.

Assim, embora a otto-codificação não permita a associação direta entre os rios, ela é importante porque permite a identificação do rio principal das duas redes, pois, por definição, o rio principal possui apenas algarismos ímpares no seu código. Além disso, a otto-codificação também será utilizada para determinar os afluentes desse rio principal. Para essa determinação, todos os trechos da hidrografia devem estar ordenados, lexicograficamente, pelo seu código. Sabe-se que os trechos cujos códigos possuem apenas algarismos ímpares pertencem ao rio principal, cada trecho que estiver entre um par de trechos pertencente ao rio principal é obrigatoriamente um afluente desse rio. Assim, o primeiro passo é, identificar o rio principal de cada rede de drenagem. Posteriormente, os respectivos afluentes devem ser identificados e deve ser realizada a associação entre os afluentes correspondentes. A identificação dos afluentes é feita classificando-os em dois grupos: os afluentes à direita e à esquerda do rio principal. Daí, cada afluente da rede computada de um determinado grupo é comparado com todos os afluentes da rede de referência do grupo correspondente e o que for mais similar será o escolhido. A similaridade entre os afluentes é determinada calculando a média da distância do ponto em questão até o afluente da rede referência. Ou seja, dado um afluente  $X$  com  $n$  pontos  $p_1, \dots, p_n$  da rede computada, a similaridade deste afluente com um afluente  $Y$  da rede de referência é dada pela Equação 1, onde  $d$  é a função distância.

$$Dif(X, Y) = \frac{\sum_{i=1}^n d(p_i, Y)}{n} \quad (1)$$

Quanto menor a média, mais similares são os afluentes. Assim, o afluente  $X$  será associado ao afluente  $Y$  da rede de referência cujo valor de  $Dif(X, Y)$  for mínimo. Caso dois ou mais afluentes da rede computada seja associado a um mesmo afluente da rede de referência então a associação será feita considerando o par com o menor valor para  $Dif$ .

É importante ressaltar que este processo de associação é realizado de forma recursiva, pois, cada afluente pode possuir (sub-)afluentes e assim, no próximo passo, o afluente assume o papel de rio principal e o processo se repete.

Após a associação entre todos os afluentes das duas redes, a similaridade entre as duas redes pode ser computada. Esse processo consiste em avaliar os seguintes fatores:

1.  $Dif(X, Y)$ : valor da equação 1 aplicado a cada  $X$  de  $D_T$  associado a  $Y$  de  $D_R$ .
2.  $d(N_X, N_Y)$ : distância da nascente do afluente  $X$  de  $D_T$  ( $N_X$ ) à nascente do afluente  $Y$  de  $D_R$  ( $N_Y$ ).
3.  $d(N_X, Y)$ : distância da nascente do afluente  $X$  de  $D_T$  ( $N_X$ ) ao afluente  $Y$  de  $D_R$ .

4.  $d(F_X, F_Y)$ : distância entre a foz do afluente  $X$  de  $D_T$  ( $F_X$ ) e a foz do afluente  $Y$  de  $D_R$  ( $F_Y$ ).

Além desses itens, é calculado um erro relativo, que considera os valores de  $d(N_X, N_Y)$  e  $d(N_X, Y)$  divididos pelo valor do comprimento do afluente  $Y$  de  $D_R$  dado por  $C_Y$ .

#### 4. Resultados e Discussão

A métrica foi testada para vários terrenos, como por exemplo os referentes às redes das figuras 4 e 5. Os resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 1 e 2 que lista as associações entre os afluentes, que são estabelecidas pelos códigos otto, o erro para cada par de afluentes considerando  $Dif(X, Y)$ ,  $d(N_X, N_Y)$ ,  $d(N_X, Y)$  e  $d(F_X, F_Y)$ , além dos erros relativos que consideram o comprimento do afluente.

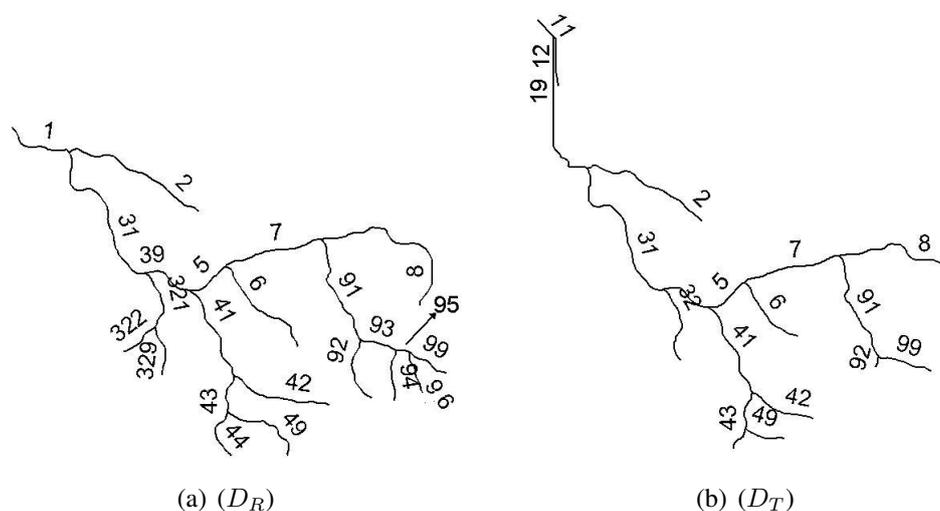


Figura 5: Redes  $D_R$  e  $D_T$  utilizadas para teste.

Tabela 1: Resultado do teste para a rede da Figura 4

(a)

Código Otto		Erros						$C_Y$
X	Y	$Dif(X, Y)$	$d(N_X, N_Y)$	$d(N_X, Y)$	$d(N_X, N_Y)/C_Y$	$d(N_X, Y)/C_Y$	$d(F_X, F_Y)$	
12	2	2.67	402.37	2.67	40.183%	0.267%	0.92	1001.36
2	4	0.07	427.39	0.07	29.928%	0.005%	1.03	1428.07
4	52	2.95	292.44	2.95	32.026%	0.323%	1.80	913.16
6	6	1.49	318.91	1.49	27.804%	0.130%	4.34	1146.98
72	72	0.23	386.56	0.23	55.526%	0.033%	5.39	696.17
8	8	0.33	266.91	0.33	22.168%	0.028%	5.47	1204.06
11 19 3 5 71 79 9	1 3 51 59 71 79 9	1.03	196.74	0.54	3.811%	0.011%	351.40	5161.71
<b>Erro Médio</b>		<b>1.25</b>	<b>327.33</b>	<b>1.18</b>	<b>30.207%</b>	<b>0.114%</b>	<b>52.91</b>	

Verifica-se que no caso do terreno representado pela figura 4, cujos resultados são mostrados na tabela 1, as associações apresentam um erro pequeno para distância média entre os pontos de  $X$  até o afluente associado  $Y$  dados por  $Dif(X, Y)$ , chegando à um máximo de 2,95 metros. Porém, verifica-se que o erro relacionado à distancia entre as nascentes, dado por  $d(N_X, N_Y)$ , é elevado, principalmente se considerarmos a relação com o comprimento( $d(N_X, N_Y)/C_Y$ ), sendo que o erro médio é maior que 30%. Apesar desse erro ser elevado, as nascentes  $X$  estão bem próximas do afluente  $Y$  como se nota nos resultados

Tabela 2: Resultado do teste para a rede da Figura 5

(a)

Código Otto		Erros						$C_Y$
X	Y	$Dif(X, Y)$	$d(N_X, N_Y)$	$d(N_X, Y)$	$d(N_X, N_Y)/C_Y$	$d(N_X, Y)/C_Y$	$d(F_X, F_Y)$	
2	2	3.57	155.66	3.57	10.424%	0.239%	1405.11	1493.27
32	321 322 329	2.03	311.90	2.03	20.308%	0.132%	544.87	1535.89
42	42	2.24	335.83	2.24	32.619%	0.218%	1.41	1029.58
44	44	0.03	278.09	0.03	51.991%	0.006%	2.40	534.87
41 43 49	41 43 49	2.08	396.79	4.67	17.694%	0.208%	2.12	2242.47
6	6	2.35	317.02	2.35	27.930%	0.207%	2.38	1135.06
8	8	1.01	400.72	1.01	22.923%	0.058%	2.64	1748.13
92	92	2.63	486.74	2.63	72.580%	0.393%	1.30	670.62
11 19 31 39 5 7 91 99	1 31 39 5 7 91 93 95 99	136.61	381.38	1.04	5.994%	0.016%	1223.39	6362.56
<b>Erro Médio</b>		<b>16.95</b>	<b>340.46</b>	<b>2.17</b>	<b>29.163%</b>	<b>0.164%</b>	<b>353.96</b>	

de  $d(N_X, Y)$  e  $d(N_X, Y)/C_Y$ . No que diz respeito à distância entre as fozes ( $d(F_X, F_Y)$ ), elas estão relativamente próximas, exceto ao analisar a distância entre as fozes do rio principal da rede, esse fato eleva a média dos resultados.

Ao analisar os resultados Tabela 2, nota-se que o erro médio dado por  $d(N_X, N_Y)/C_Y$  é semelhante ao encontrado para o terreno representado pela Figura 4. Porém, neste caso o erro dado por  $Dif(X, Y)$  é um pouco maior, sendo que a média é 16,95. Isso acontece porque tem-se uma grande diferença no rio principal. Nesse caso, também pode-se verificar que o erro dado por  $d(F_X, F_Y)$  é bem elevado, principalmente considerando os trechos que possuem códigos otto iguais a "2", "32" e "11 19 31 39 5 7 91 99" em  $X$ .

Nas associações mostradas na Tabela 1 tem-se que cada trecho de  $D_T$  é associado a um trecho de  $D_R$  o que não acontece na Tabela 2 já que o afluente com código otto "12" de  $D_T$  não está associado a nenhum outro de  $D_R$  e os afluentes com códigos otto "94" e "96" de  $D_R$  não estão associados a nenhum outro afluente de  $D_T$ .

## 5. Conclusões e Trabalhos Futuros

De acordo com os testes realizados, a métrica apresentou resultados interessantes indicando de maneira adequada as várias inconsistências. Através dos resultados pode-se extrair informações de coerência entre as hidrografias comparadas, levando em consideração fatores como distância média entre pontos, distâncias entre nascentes, fozes e inclusive relacioná-los com o comprimento do rio. Porém, também foi notado que, muitas vezes, não há uma relação adequada entre o valor do erro e o tamanho total da rede, pois, um mesmo valor tem significados diferentes considerando o tamanho da rede. Este inconveniente está sendo objeto de estudos e o objetivo é introduzir avaliações que levem em conta o tamanho da rede.

## Referências

- ANDRADE, M. et al. Efficient viewshed computation on terrain in external memory. *GeoInformatica*, Springer Netherlands, p. 1–17, 2009. ISSN 1384-6175. 10.1007/s10707-009-0100-9. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10707-009-0100-9>>.
- BESPAMYATNIKH, S. et al. On the planar two-watchtower problem. In: *In 7th International Computing and Combinatorics Conference*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 121–130.
- CHAVES, M. A. *Modelos digitais de elevação hidrologicamente consistentes para a bacia amazônica*. Tese (Doutorado) — Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, 2002.
- DANNER, A. et al. Terrastream: from elevation data to watershed hierarchies. In: *Proc. of ACM GIS*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 117–124.

FRANKLIN, W. R.; VOGT, C. Tradeoffs when multiple observer siting on large terrain cells. In: *12th International Symposium on Spatial Data Handling*. [S.l.: s.n.], 2006.

FURNAS, F.; OLIVEIRA, F. Watershed topology: The pfafstetter system. In: *ESRI USER CONFERENCE*. San Diego: [s.n.], 2001.

LOPES, F. C. A.; SANTOS, I. Avaliação da discretização do Índice topográfico no desempenho do topmodel. In: *V Seminário Latino Americano de Geografia Física e I Seminário Íbero Americano de Geografia Física*. Santa Maria, RS, Brasil: [s.n.], 2008.

PFAFSTETTER, O. Classificação de bacias hidrográficas (manuscrito não publicado). In: . Departamento Nacional de Obras de Saneamento, Rio de Janeiro, RJ, BRA: [s.n.], 1989.

SILVA, N. S. et al. Sistema de otto-codificação modificado para endereçamento de redes hidrográficas. *Revista Árvore*, v. 32, n. 5, p. 891–897, 2008.

TEIXEIRA, A. d. A. et al. Topologia hídrica: uma proposta para gestão de recursos hídricos utilizando sistema de informações geográficas. In: *Anais do XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Florianópolis, Brasil: INPE, 2007. p. 3597–3605.

TRACY, D. M. et al. Path planning on a compressed terrain. In: *GIS '08: Proceedings of the 16th ACM SIGSPATIAL international conference on Advances in geographic information systems*. New York, NY, USA: ACM, 2008. p. 1–4. ISBN 978-1-60558-323-5.

VOGT, J. V.; COLOMBO, R.; BERTOLO, F. Deriving drainage networks and catchment boundaries: a new methodology combining digital elevation data and environmental characteristics. *Geomorph.*, v. 53, n. 3-4, p. 281–298, 2003.

WALKER, J. P.; WILLGOOSE, G. R. On the effect of digital elevation model accuracy on hydrology and geomorphology. *Water Resources Research*, v. 35, n. 7, p. 2259–2268, Jul. 1999.