

Comparação de Métodos para Definir Direções de Escoamento a partir de Modelos Digitais de Elevação

Diogo Costa Buarque, Fernando Mainardi Fan, Adriano Rolim da Paz, Walter Collischonn

Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH/UFRGS

diogo.buarque@gmail.com, fernando.fan@bol.com.br, adrianorpaz@yahoo.com.br, collischonn@uol.com.br

Recebido: 06/05/09 – revisado: 05/06/09 – aceito: 16/06/09

RESUMO

A representação do relevo em computadores é cada vez mais utilizada em hidrologia. Sua aplicação vai desde a simples definição da área da bacia ou dos divisores de água até a extração de informações necessárias para a modelagem hidrológica. Uma das primeiras etapas na análise de um Modelo Digital de Elevação (MDE) para estas aplicações é a definição de uma matriz de direções de escoamento a partir da matriz de elevações. Para isto, um algoritmo conhecido como D8 é o mais frequentemente empregado, mas seus resultados dependem da forma como são contornadas as situações em que existem áreas planas e depressões espúrias na matriz que representa o relevo. Este artigo descreve alguns dos métodos mais frequentemente utilizados para determinação das direções de escoamento existentes em programas computacionais de geoprocessamento, e analisa seus resultados a partir de testes utilizando um modelo digital de elevação disponível em escala global.

Palavras-chave: geoprocessamento, direções de escoamento, rede de drenagem, bacia hidrográfica.

INTRODUÇÃO

A caracterização física da bacia hidrográfica e do sistema de drenagem constitui uma das etapas iniciais na maioria dos estudos hidrológicos. Incluem-se nesta caracterização tarefas como delimitação da bacia, determinação da área de contribuição em pontos de interesse, identificação dos principais cursos d'água e obtenção de características como comprimento, declividade e perfil longitudinal dos rios. Tradicionalmente, tais informações eram preparadas manualmente a partir de mapas topográficos impressos. Atualmente, ferramentas de geoprocessamento e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm sido empregados para obter as mesmas informações a partir do processamento automático de dados digitais de elevação do terreno (Burrough e McDonnel, 1998; Mendes e Cirilo, 2001; Miranda, 2005).

O desenvolvimento e aprimoramento de SIGs e algoritmos de processamento automático, em combinação com o aumento da capacidade computacional e da disponibilidade de dados obtidos via sensoriamento remoto, têm permitido preparar diversos planos de informação para estudos hidroló-

gicos de grandes áreas a baixo custo e com incrível rapidez.

Os dados topográficos são usualmente manipulados sob a forma de um Modelo Numérico do Terreno (MNT) ou Modelo Digital de Elevação (MDE), cuja representação mais comum é através de uma matriz ou imagem raster, onde cada elemento ou pixel tem como atributo o valor de elevação do terreno em relação a um determinado referencial (Burrough e McDonnel, 1998). Atualmente, a principal fonte de dados de elevação do terreno em escala global é a base de dados obtida pelo projeto Shuttle Radar Topographic Mission – SRTM (Farr et al., 2007) e disponibilizada gratuitamente na Internet (Rabus et al., 2003; Sun et al., 2003).

Uma das primeiras etapas da análise da topografia para derivar informações de interesse hidrológico é a definição de direções de escoamento para cada elemento da matriz do MDE. A partir das direções de escoamento são calculados outros parâmetros ou variáveis de interesse hidrológico, como a área de drenagem a montante de cada célula, delimitação de sub-bacias, definição da rede de drenagem, determinação de comprimentos e declividades de trechos de rio, etc.

Os primeiros métodos para definir direções de escoamento a partir de um MDE foram descritos

ao longo da década de 80 por O'Callaghan e Mark (1984), Mark (1984) e Jenson e Domingue (1988).

Durante os anos seguintes, algumas modificações foram sugeridas a esses métodos básicos, incluindo a possibilidade de existir escoamento em múltiplas direções (Quinn et al., 1991; Tarboton, 1997), a combinação de informações vetoriais da rede de drenagem com o MDE para torná-lo hidrológicamente compatível (Hutchinson, 1989; Soille et al., 2003; Kenny e Matthews, 2005; Turcotte et al., 2001; Callow et al., 2007) e a necessidade de evitar redes de drenagem paralelas em regiões homogêneas (Fairfield e Leymarie, 1991).

A recente disponibilização de um MDE relativamente detalhado para praticamente todas as superfícies continentais do planeta, através de uma missão específica do ônibus espacial americano – o Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) –, facilitou ainda mais o acesso a MDEs e intensificou o seu uso para aplicações em hidrologia (Sun et al., 2003; Rabus et al., 2003; Paz et al., 2006; Valeriano et al., 2006; Paz e Collischonn, 2007; Paz e Collischonn, 2008; Paz et al., 2008; Rennó et al., 2008).

Atualmente, uma das questões que continua motivando novas pesquisas é a necessidade de definir direções de escoamento em regiões planas ou em depressões artificialmente criadas por erros na obtenção do MDE. Essa questão, solucionada inicialmente em trabalhos como o de Jenson e Domingue (1988) e Garbrecht e Martz (1997), continua atraindo a atenção de diferentes pesquisadores porque os resultados obtidos com os métodos tradicionais são, às vezes, insatisfatórios (Martz e Garbrecht, 1999; Planchon e Darboux, 2001; Jones, 2002; Tianqi et al., 2003; Orlandini e Moretti, 2009). Outro problema no tratamento de áreas planas para a geração de direções de fluxo pode ser o custo computacional excessivo no caso do MDE com grande número de elementos (Gong e Xie, 2009; Wang e Liu, 2006; Zhu et al., 2006).

Com a existência de diferentes algoritmos destinados à obtenção de direções de escoamento a partir do MDE, surge a indagação sobre qual método fornece o melhor resultado em diferentes situações. Neste sentido, este artigo apresenta e compara 5 métodos de geração de direções de fluxo a partir do MDE quanto ao desempenho na definição da rede de drenagem em áreas planas. Também é analisada a hidrografia vetorial otocodificada disponibilizada pela Agência Nacional de Águas na escala 1:1.000.000 ([HTTP://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual](http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual)).

MÉTODOS DE DEFINIÇÃO DE DIREÇÕES DE ESCOAMENTO

Existem muitos métodos de definição das direções de escoamento com base em modelos digitais de elevação. A maior parte desses métodos define, para uma dada célula, ou elemento da matriz, um código de direção de fluxo que indica para qual das 8 células vizinhas o escoamento deverá seguir, ou seja, uma direção de fluxo única. Outro grupo de métodos permite a partição do escoamento de uma determinada célula para mais de uma célula vizinhança, isto é, direções de fluxo múltiplas.

Nos métodos que trabalham com direção de fluxo única, normalmente a determinação da direção ocorre por um critério de maior declividade. A declividade de uma linha ligando a célula central a cada uma de suas vizinhas é calculada e é identificada a célula vizinha para a qual a declividade é máxima (Mark, 1984; O'Callaghan e Mark, 1984). Essa idéia central dá origem aos algoritmos chamados D8 (*deterministic eight-neighbors*), como os de Jenson e Domingue (1988), Planchon e Darboux (2001) e PFS (Sedgewick, 1992), tratados neste artigo. A diferença entre tais métodos está na forma com que são tratadas as situações em que não existe uma declividade máxima única, na forma como são consideradas as regiões planas, e na forma como são resolvidas as áreas de depressões, que são regiões isoladas com cotas mais baixas que a vizinhança.

O algoritmo de Jenson e Domingue

O algoritmo de Jenson e Domingue tem duas idéias gerais: a atribuição de direções de fluxo conforme a maior declividade e o incremento artificial da altitude de células ou conjunto de células que configuram áreas de depressão, até que se encontre um caminho de escoamento. Mais especificamente, o referido algoritmo é composto por sete etapas básicas, algumas delas com desdobramentos em vários passos. Resumidamente, o algoritmo é descrito aqui em 4 etapas principais:

1. Identificação e preenchimento de depressões simples, que são aquelas células isoladas cuja altitude é inferior a altitude das suas 8 células vizinhas. A altitude da célula considerada uma depressão simples é aumentada para o valor da altitude da célula vizinha mais baixa.

2. Cálculo das direções de fluxo, através dos seguintes passos:

2.1. Para cada célula determina-se a sua declividade em relação a cada uma das 8 células vizinhas, dada pela diferença de altitudes dividida pela distância entre os centros das células. Para as células vizinhas ortogonalmente, a distância é tomada como a largura da célula (posições 2, 8, 32 e 128 na Figura 1a). Para as demais células, vizinhas diagonalmente, a distância é $\sqrt{2}$ vezes a largura da célula.

2.2. Atribuição da direção de fluxo, segundo três situações: (a) se a maior declividade é positiva ou nula e ocorre para apenas uma das células vizinhas, a direção de fluxo é atribuída no sentido dessa célula (Figura1); (b) se a maior declividade é positiva, mas ocorre empate entre duas ou mais células, a direção de fluxo é atribuída segundo uma regra de desempate que procura o caminho central entre as candidatas empatadas; (c) se a maior declividade é nula e ocorre para mais de uma célula, guarda-se a informação de quais direções constituem o empate.

2.3. Para cada célula da situação (c) do passo anterior são identificadas as células vizinhas que proporcionaram o empate de maiores declividades: se uma dessas células tem direção de fluxo válida e que não aponta para a célula em análise, atribui-se a direção de fluxo no sentido dessa célula vizinha.

2.4. Repete-se o passo anterior (2.3) até que não se possa atribuir direção de fluxo para nenhuma célula.

3. Tratamento das grandes depressões: as células com direção de fluxo indefinida e localizadas contiguamente formam uma grande depressão. Para cada grande depressão identifica-se qual célula da borda tem a célula vizinha de menor altitude. Tal célula vizinha é tida como potencial exutório da depressão. Verifica-se também se as depressões compartilham uma mesma célula exutório, o que possibilita considerá-las como uma única depressão, ou seja, elas se fundem. Para cada grande depressão, segue-se o caminho de fluxo a partir do potencial exutório. Caso esse caminho

conduza à borda da imagem, o exutório testado é válido como saída para o escoamento daquela depressão. Nesse caso, todas as células da depressão que têm altitude inferior à altitude dessa célula exutório passam a ter esse valor. Caso o caminho traçado desde a célula exutório de uma depressão alcance outra depressão, as células do caminho e as depressões de origem e destino passam a formar uma única depressão ainda maior. Nessa situação, repete-se a seleção da célula exutório e o teste do caminho de fluxo a partir dessa célula.

4. Retorna-se ao passo 2 aplicando-o exclusivamente às células ainda sem direção indefinida. O processo se repete até ocorrer a convergência e todas as células da imagem terem direções de fluxo válidas.

O algoritmo de Jenson e Domingue (1988) está implementado, por exemplo, no programa ArcGIS®, no conjunto de ferramentas Arc-Hydro® e no Terrain Analysis System (TAS) e já teve modificações sugeridas. Uma das modificações foi proposta por Paz et al. (2006), o qual implementou o algoritmo e introduziu um fator de aleatoriedade para a definição da direção de fluxo em células com a mesma declividade que as vizinhas, atenuando, assim, o problema do surgimento de possíveis drenagens paralelas.

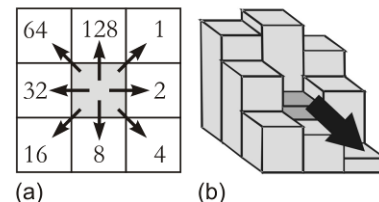


Figura 1 - (a) Codificação usada para distinguir as 8 direções de fluxo possíveis no método D8; (b) atribuição de direção de fluxo pela regra da maior declividade.

O algoritmo de Planchon e Darboux

O algoritmo de Planchon e Darboux (2001) está implementado nas funções do programa Terrain Analysis System (TAS). Este algoritmo é simples e mais rápido que o algoritmo de Jenson e Domingue, pois precisa de apenas dois estágios básicos de operação, enquanto que o de Jenson e Domingue necessita de sete estágios básicos de operação, alguns incluindo sub-rotinas complexas.

O primeiro estágio do método consiste em inundar toda a superfície do MDE com uma altura infinita de água, exceto as células pertencentes às bordas da imagem. No segundo estágio as altitudes são reduzidas iterativamente até que, passo a passo, a superfície convirja a uma superfície final desejada, com as depressões removidas.

Quando o método de Planchon e Darboux é utilizado para extrair a rede de drenagem em um MDE, é definida uma pequena diferença de altitude positiva (ΔZ_{viz}) para cada uma das oito direções entre uma célula e sua vizinhança. Assim, cada célula terá uma direção de drenagem definida e estará conectada aos limites do MDE seguindo um caminho decrescente.

Durante o segundo estágio, duas operações são aplicadas a todos os vizinhos de todas as células para assegurar a convergência. A operação (1) refere-se aos casos em que a altitude final (Z) pode ser escolhida como igual à altitude do MDE (Z_{MDE}), mantendo um caminho decrescente que passa por, pelo menos, uma célula vizinha. Se a operação (1) ocorre, a célula atinge seu valor mínimo e, em consequência, sua altitude não é mais modificada, não esquecendo que no início todas as altitudes, exceto pelas bordas, são iguais a infinito:

$$Z_{MDE} \geq Z_{viz} + \Delta Z_{viz} \rightarrow Z = Z_{MDE} \quad (1)$$

A operação (2) trata do caso oposto, quando a Altitude do MDE é menor que as altitudes da vizinhança. Nesses casos, a altitude da célula é trocada pela altitude da vizinhança (Z_{viz}) mais a pequena declividade (ΔZ_{viz}):

$$Z_{MDE} < Z_{viz} + \Delta Z_{viz} < Z \rightarrow Z = Z_{viz} + \Delta Z_{viz} \quad (2)$$

O estágio dois é executado várias vezes e com todas as células do MDE até que nenhuma modificação a mais seja necessária e, portanto, todas as depressões tenham sido removidas.

A superfície final resultante é definida por três propriedades (Planchon e Darboux, 2001):

- A. A superfície final terá sempre altitude maior ou igual à inicial;
- B. Para cada célula da superfície final existe um caminho que segue até os limites do MDE, com um declive igual ou superior a ΔZ_{viz} ;
- C. A superfície final é a menor superfície permitida pelas propriedades "a" e "b".

O algoritmo PFS

O algoritmo PFS também está dividido em dois estágios, onde o primeiro procura um caminho que direcione o fluxo para fora da região de depressão. Esse caminho é denominado "caminho do fluxo" (flow path) e as células desse caminho são parte de um "conjunto do caminho do fluxo" (flow path pool). Um "algoritmo de busca por prioridade" (PFS – Priority First Search - Sedgewick, 1992) é usado para determinar esse caminho e contém 4 passos:

- A. Começando da depressão, um pixel em particular é adicionado ao conjunto do caminho do fluxo e as suas oito células vizinhas são adicionadas como um conjunto de candidatas ao conjunto do caminho do fluxo;
- B. O conjunto de candidatas é analisado em busca da que tenha menor valor;
- C. A célula mais baixa é então movida do conjunto de candidatas para o conjunto do caminho do fluxo e as suas oito vizinhas são adicionadas ao conjunto de candidatas;
- D. Os passos b e c são repetidos até que uma célula com um valor menor que a depressão seja encontrada, ou até que os limites do MDE sejam alcançados.

O segundo estágio é ajustar os valores das células ao longo do caminho do fluxo para que elas formem um caminho decrescente. A célula inicial é a primeira célula de depressão escolhida no primeiro estágio. A célula final é a célula que tenha um valor menor que a depressão ao longo do caminho do fluxo, ou a célula localizada no limite do MDE. Se a célula no limite do MDE tem um valor maior que a depressão seu valor é trocado pelo valor da depressão menos um. Iniciando da célula inicial, um ajuste linear é aplicado de acordo com a distância ao longo do caminho do fluxo para deixá-lo com um valor gradualmente decrescente.

O algoritmo PFS guarda semelhanças com algoritmos utilizados no traçado de caminhos ótimos em ambientes raster, como o algoritmo de Dijkstra (Collischonn e Pilar, 2000; Burrough e MacDonnel, 1998).

MÉTODOS DE DIREÇÕES MÚLTIPLAS

Diferentemente dos algoritmos D8, os métodos de direções múltiplas admitem que o escoamento

mento de uma célula possa se dirigir para mais de uma das oito células vizinhas. A abordagem de direções múltiplas surgiu com o intuito de minimizar o que era tido como uma limitação do método D8. A consideração de direção única adotada nos métodos D8 é, a rigor, uma simplificação da situação real, já que o fluxo gerado em uma determinada célula realmente não segue concentrado para apenas uma das 8 células vizinhas.

Os métodos de direções múltiplas procuram retratar esse aspecto, particionando o escoamento entre mais de uma célula vizinha (Tarboton, 1997; Quinn et al., 1991; Seibert e McGlynn, 2007). Contudo, em termos de definição de rede de drenagem e áreas de drenagem, a adoção de direções múltiplas não é adequada devido à perda de ligação única pixel a pixel e à geração de limites difusos e sobrepostos de áreas de contribuição (Jones, 2002). Por isso, este artigo aborda apenas métodos de direção única para cada célula (D8).

METODOLOGIAS DE PRÉ-PROCESSAMENTO

Grande parte dos modelos digitais de elevação possui dificuldades em representar adequadamente padrões hidrológicos, como a rede de drenagem em áreas planas (Callow et al., 2007). A posição adequada da rede está associada com a definição das direções de escoamento em cada célula do MDE, cuja geração depende do método utilizado e da qualidade do MDE. Uma forma de melhorar a definição das direções de escoamento em regiões planas, ou onde o MDE apresenta erros aleatórios ou devidos à vegetação, como no caso do SRTM, é o método conhecido como “stream-burning” (Hutchinson, 1989).

Stream-burning

O stream-burning consiste em pré-processar o MDE através da incorporação de uma rede hidrográfica vetorial existente, de forma a torná-lo hidrologicamente compatível, deixando as direções de fluxo resultantes em conformidade com tal rede vetorial (Hutchinson, 1989; Graham et al., 1999; Callow et al., 2007).

O procedimento mais simples de stream-burning consiste basicamente em “imprimir” a rede vetorial existente no MDE, rebaixando a elevação das células ao longo dessa rede por um fator arbitrá-

rio. Isso faz com que tais células constituam caminhos de fluxo principais no raster de direções de fluxo gerado a partir do MDE modificado.

Métodos como o stream-burning podem ser utilizados em conjunto com qualquer um dos métodos de definição de direção de fluxo descritos antes. Embora a modificação da superfície do MDE forneça uma significativa melhora para a definição das direções de escoamento e, conseqüentemente, melhora nos demais planos derivados deste (ex: área de drenagem, comprimento de rios e delimitação de bacias), informações que necessitem dos valores das elevações, como declividades, são prejudicadas (Callow et al., 2007). Porém, de maneira geral, o pré-processamento usando stream-burning tende a melhorar a qualidade das direções de fluxo e da rede de drenagem gerada, independentemente do método utilizado na definição das direções de fluxo. Por esses motivos ele não será analisado neste artigo.

METODOLOGIA DE COMPARAÇÃO

Ao se definir as direções de escoamento, espera-se que a rede de drenagem resultante localize-se dentro da calha do rio, o que pode ser verificado a partir de uma comparação com imagens de satélite, por exemplo. Conseqüentemente, quanto maior a largura do rio, maior a probabilidade da rede gerada cair dentro da sua calha. Os diversos métodos de determinação da direção do escoamento a partir do MDE produzem resultados diferentes, os quais nem sempre concordam com a realidade, principalmente quando aplicados em regiões planas, e dependem do tratamento que cada algoritmo dá nessas regiões.

Neste trabalho foram comparados cinco métodos de obtenção das direções de fluxo a partir do MDE: Jenson e Domingue presente no TAS; Planchon and Darboux presente no TAS; Jenson e Domingue presente no ESRI – ArcGIS®; Priority First Search (PSF) presente no IDRISI®; e a modificação de Jenson e Domingue sugerida por Paz et al. (2006), a qual iremos denominar D8fa (D8 com fator de aleatoriedade). Além dos métodos mencionados, também foi comparada a hidrografia vetorial disponibilizada pela ANA – Agência Nacional de Águas, na escala de 1:1.000.000.

A hidrografia vetorial da ANA compõe a base hidrográfica otocodificada da Agência e foi obtida a partir do mapeamento sistemático da carta de hidrografia da Fundação Instituto Brasileiro de Ge-

ografia e Estatística (IBGE), na escala do milionésimo, englobando os países da América do Sul com exceção do Suriname (Teixeira et al., 2007). Como resultado obteve-se uma representação da hidrografia brasileira na forma de rede unifilar. Toda a base vem sendo mantida pela ANA para suporte à gestão de recursos hídricos em seus processos internos (ANA, 2006).

Para a comparação entre as redes de drenagem, admitiu-se que a área entre uma linha da rede de drenagem tomada como verdadeira e uma linha correspondente à rede de drenagem obtida a partir das direções de fluxo, geradas por cada um dos métodos, pode ser tratada como uma estimativa do erro. Ainda, essa área dividida pelo comprimento do rio resulta em uma largura média de erro entre as duas drenagens, o que fisicamente representa a distância média entre os traços das drenagens gerada e verdadeira. Como linha verdadeira, neste trabalho foi utilizada uma digitalização manual de imagens Landsat georeferenciadas.

APLICAÇÃO

Para a aplicação dos métodos, foram escolhidos dois trechos de rio, ambos em uma região de planície, onde as diferenças entre cada algoritmo tendem a se tornar mais evidentes. A resolução do MDE utilizado é de 90 m. A comparação entre os métodos é realizada ao nível da rede de drenagem final obtida a partir das direções de fluxo geradas por cada um deles.

O primeiro trecho escolhido foi uma porção (~484 km de comprimento e largura média de 300 m) do rio Purus, compreendida no retângulo de vértice superior esquerdo $-66,38^\circ; -7,40^\circ$ e vértice inferior direito $-65,22^\circ; -7,76^\circ$ (Figura 2). O Rio Purus é um dos afluentes mais importantes da margem esquerda do rio Solimões. Nasce na Serra de Contamana, no Peru, com aproximadamente 500 m de altitude, e percorre cerca de 3.700 km, cortando os estados brasileiros do Acre e Amazonas e desaguardo no Rio Solimões, a cerca de 230 km da Cidade de Manaus. Sua bacia de drenagem possui uma área de, aproximadamente, 376.000 km², dos quais 73% encontram-se no Estado do Amazonas, 21% no Estado do Acre, 5,5% no Peru e 0,5% na Bolívia. O Rio Purus é considerado como navegável num trecho de cerca de 2.550 km desde sua foz no Solimões até a Boca do Acre. Porém, com características de rio de baixada, possui um percurso caracterizado

pelo aspecto meândrico, bastante sinuoso e com curvas bem fechadas.

O segundo trecho escolhido foi uma porção (~254,5 km de comprimento e largura média de 120 m) de um afluente da margem direita do rio Purus, o rio Ituxi (Figura 2), localizada dentro do retângulo de vértice superior esquerdo $-66,20^\circ; -8,10^\circ$ e vértice inferior direito $-65,29^\circ; -8,89^\circ$. O rio Ituxi percorre cerca de 450 km até sua confluência com o rio Purus, abrangendo uma área de drenagem de quase 45.000 km², também sendo caracterizado por trechos bastante sinuosos e com curvas fechadas, localizado numa região de baixada.

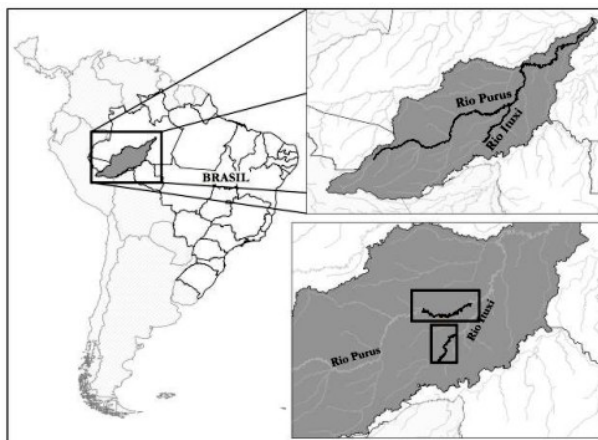


Figura 2 - Localização dos trechos estudados.

RESULTADOS

Na Figura 3 é apresentada uma comparação entre a rede de drenagem considerada como verdadeira (linha cinza) e a rede obtida pelo método do Planchon and Darboux presente no TAS (linha tracejada), ambas para o trecho do rio Ituxi. Para melhor visualização, na figura está apresentada apenas uma parte do trecho de estudo. Observa-se que as linhas não são coincidentes em muitos pontos, cujas diferenças provocam alterações, principalmente, na determinação do comprimento do rio. Uma estimativa do erro na determinação da rede pelo método utilizado, em relação à rede adotada como verdadeira, pode ser obtida computando-se o valor da área compreendida entre as duas curvas, como apresentado na Figura 4.

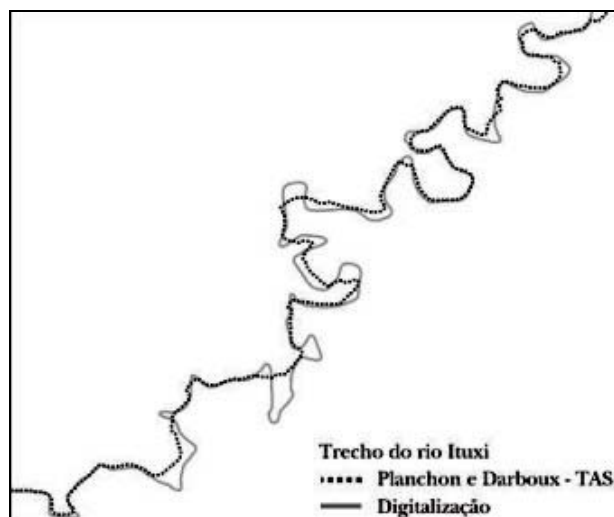


Figura 3 - Redes de drenagem verdadeira obtida por digitalização (linha cinza) vs. rede gerada por Planchon and Darboux – TAS (linha tracejada).

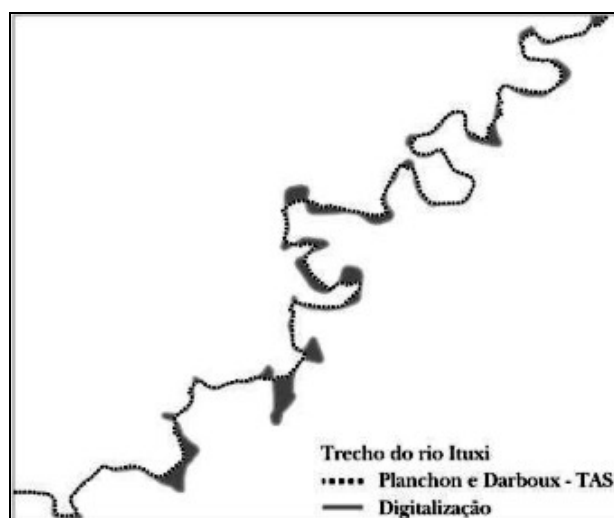


Figura 4 - Área entre as duas linhas, correspondente a uma estimativa do erro na determinação da rede de drenagem.

As Tabelas 1 e 2 resumem os resultados da área entre as drenagens e da largura média de erro obtidos para cada um dos métodos utilizados. Nas tabelas esses valores também estão apresentados para o caso da comparação entre a drenagem verdadeira e a rede vetorial da ANA. As maiores diferenças de áreas foram observadas para o rio mais largo (rio Purus, com 300 m de largura média), com exceção do resultado obtido pelo método D8fa, cujas diferenças de áreas foram muito semelhantes

entre os dois trechos comparados. Isso se deve ao fato de que as áreas entre as curvas tendem a aumentar com a largura do rio, pois quanto mais largo, mais células do MDE comporão sua largura e maior será a sua área plana, dificultando o tratamento pelo algoritmo.

Os valores obtidos de largura média do erro (Tabela 2) mostraram-se mais elevados para o caso da comparação com a rede vetorial da ANA. Visualmente, observou-se que o erro de área foi mais distribuído ao longo do trecho para esta comparação em relação às comparações com os demais métodos, nas quais as maiores áreas entre as redes de drenagem se localizaram em trechos com muitas curvas (características meândricas).

Tabela 1 - Área (km²) entre as curvas.

| Algoritmo | Rio Purus | Rio Ituxi |
|-----------------------------|-----------|-----------|
| ANA | 76.3 | 45.16 |
| PFS - IDRISI® | 42.03 | 15.55 |
| Planchon e Darboux – TAS | 42.03 | 30.65 |
| Jenson e Domingue – TAS | 33.54 | 29.87 |
| Jenson e Domingue – ArcGIS® | 35.53 | 29.87 |
| Jenson e Domingue – D8fa | 29.39 | 30.94 |

Tabela 2 - Distância média (m) do erro.

| Algoritmo | Rio Purus | Rio Ituxi |
|-----------------------------|-----------|-----------|
| ANA | 157.56 | 177.42 |
| PFS - IDRISI® | 86.79 | 61.09 |
| Planchon e Darboux – TAS | 86.79 | 120.41 |
| Jenson e Domingue – TAS | 69.26 | 117.35 |
| Jenson e Domingue – ArcGIS® | 73.37 | 117.35 |
| Jenson e Domingue – D8fa | 60.69 | 121.55 |

Porém, uma vez que a drenagem verdadeira foi obtida manualmente, há sempre uma subjetividade envolvida na definição da sua localização ao longo do trecho visto que é sempre possível definir infinitas linhas passando dentro da calha do rio. Assim, considerando que a largura do rio permite que mais de uma linha passe dentro da sua calha, uma área compreendida entre a linha verdadeira e uma linha gerada dentro da calha do trecho não caracteriza um erro do método, mas apenas uma simples diferença entre as localizações da rede gerada e da digitalização manual, ambas devendo ser consideradas representativas do trecho, como ocor-

re na Figura 5. Desta forma, os valores apresentados na Tabela 1 podem estar contabilizando falsos erros.

Para evitar esse problema e obter uma comparação mais eficiente entre os métodos, foi realizada uma operação de "buffer" (Figura 6), na qual um polígono com uma largura pré-definida é desenhado ao redor do objeto desejado, no caso, a linha definida como verdade, com a largura média de cada rio. Em seguida, foram calculadas apenas as áreas entre as linhas dos métodos e o buffer (Figura 7). Assim, considerando uma largura média dos trechos em estudo, definiu-se um buffer de 300m para o rio Purus e outro de 120m para o seu afluente, o rio Ituxi.

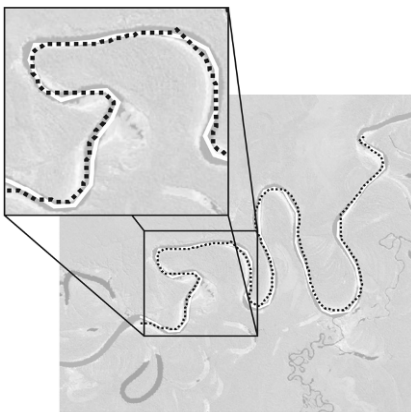


Figura 5 - Drenagem verdadeira (linha contínua) vs. drenagem obtida pelo método de Planchon and Darboux presente no TAS (linha tracejada). As duas linhas passam dentro da calha do rio e, portanto, podem ser consideradas como corretas.



Figura 6 - Buffer representando a largura media do rio (linha contínua).

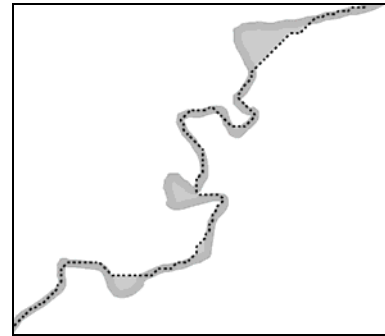


Figura 7 - Exemplo de determinação da área entre o buffer do traçado real do rio e a drenagem gerada pelos algoritmos testados.

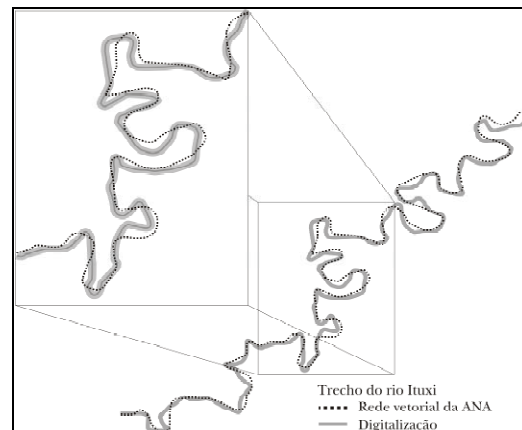


Figura 8 - Rede digitalizada vs. rede vetorial disponibilizada pela ANA (rio Ituxi).

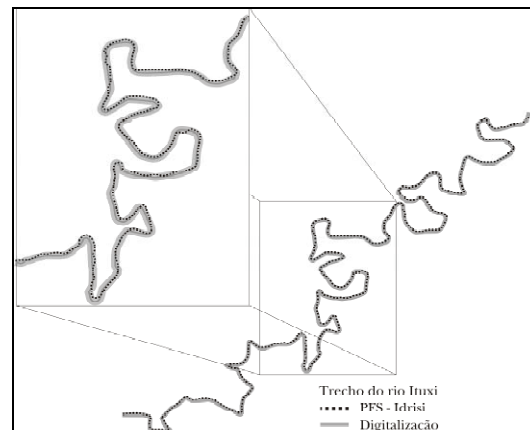


Figura 9 - Rede digitalizada vs. rede gerada pelo algoritmo PSF implementado no IDRISI® (rio Ituxi).

As diferenças na representação da rede, visualizadas entre os métodos, podem ser vistas da

Figura 13 a Figura 10, para uma parte do trecho do rio Ituxi. A primeira comparação foi realizada utilizando a rede vetorial da ANA (Figura 8), onde se observam divergências entre os resultados. Embora a rede da ANA tenha sido obtida a partir do mapeamento de cartas de hidrografia do IBGE, esta foi a comparação que resultou no maior erro de área e largura média, e essa elevada diferença em relação aos demais métodos, principalmente para o rio Purus, sugere uma fragilidade dessa rede em representar a real localização dos trechos, observada nas imagens de satélites.

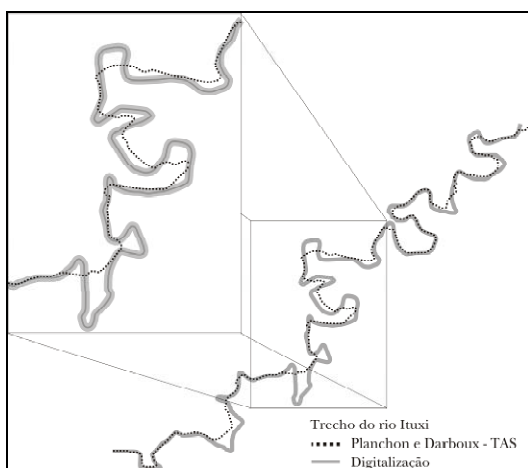


Figura 10 - Rede digitalizada vs. rede gerada pelo algoritmo de Planchon e Darboux – TAS (rio Ituxi).

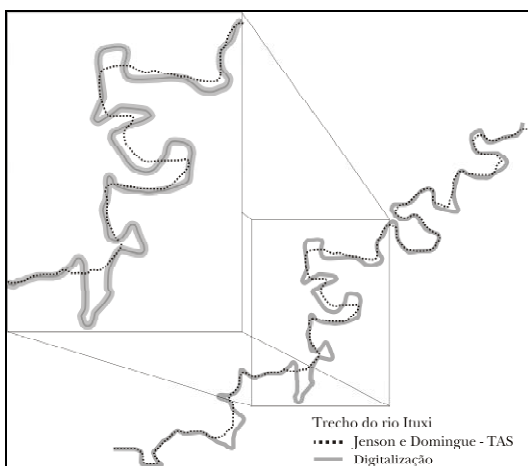


Figura 11 - Rede digitalizada vs. rede gerada pelo algoritmo de Jenson e Domingue – TAS (rio Ituxi).

Ainda comparando os resultados para o rio Ituxi, é necessário notar a redução de 87% no erro de área para o método do PFS (Figura 9) após a

aplicação do buffer. Isso significa que este método consegue representar melhor os trechos de rio em áreas planas, mesmo aqueles com larguras pequenas.

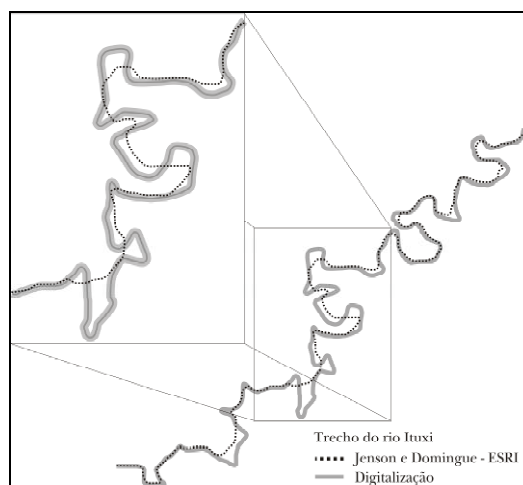


Figura 12 - Rede digitalizada vs. rede gerada pelo algoritmo de Jenson e Domingue – ArcGIS® (rio Ituxi).

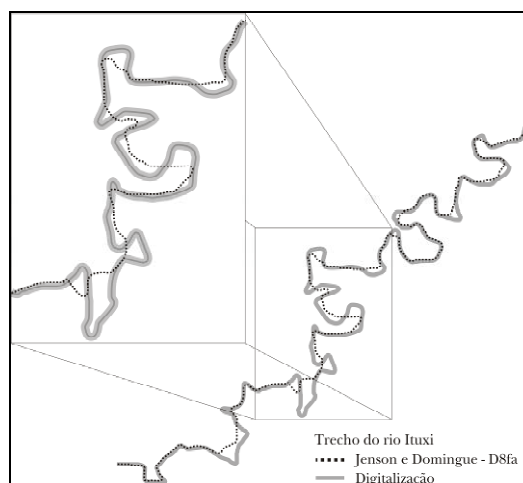


Figura 13 - Rede digitalizada vs. rede gerada pelo algoritmo de Jenson e Domingue – D8fa (rio Ituxi).

Para o caso do rio Purus, a utilização do buffer reduziu cerca de 99% do erro na área (87% na comparação com a rede da ANA), indicando que os algoritmos geraram drenagens dentro da área do buffer e que para rios mais largos o acerto na representação da rede de drenagem pelos métodos tendem a aumentar, como mostram as Figuras 14 e 15. Na Tabela 3 são apresentados os valores das áreas entre as drenagens para cada um dos métodos e, apenas para informação, na Tabela 4 estão indica-

dos os tempos que cada método levou para executar sua operação, com vantagem para os métodos PFS-IDRISI® e Jenson e Domingue-ArcGIS®.

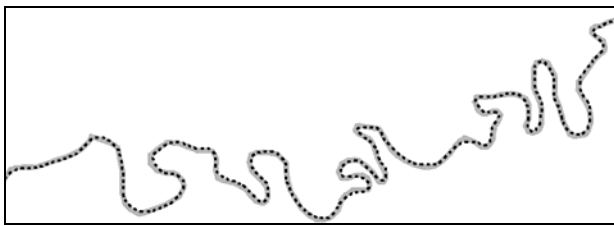


Figura 14 - Trecho digitalizado do rio Purus comparado com o gerado pelo ArcGIS®.

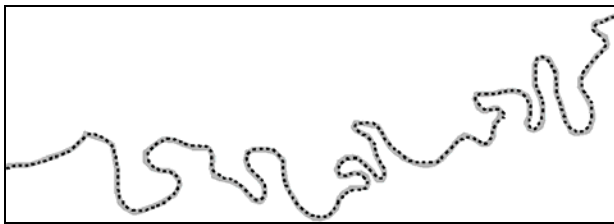


Figura 15 - Trecho digitalizado do rio Purus comparado com o gerado pelo IDRISI®.

Tabela 3 - Área (km²) entre as curvas.

| Algoritmo | Rio Purus | Rio Ituxi |
|-----------------------------|-----------|-----------|
| ANA | 10.07 | 21.25 |
| PFS - IDRISI® | 0.31 | 2.04 |
| Planchon e Darboux – TAS | 0.24 | 12.71 |
| Jenson e Domingue – TAS | 0.36 | 13.20 |
| Jenson e Domingue – ArcGIS® | 0.31 | 12.05 |
| Jenson e Domingue – D8fa | 0.38 | 12.74 |

Tabela 4 - Tempos de execução dos algoritmos.

| Algoritmo | Rio Purus | Rio Ituxi |
|-----------------------------|-----------|------------|
| ANA | - | - |
| PFS - IDRISI® | 23s | 36s |
| Planchon e Darboux – TAS | 1min45s | 2min15s |
| Jenson e Domingue – TAS | 2min32s | 5min05s |
| Jenson e Domingue – ArcGIS® | 22s | 51s |
| Jenson e Domingue – D8fa | 4h33min3s | 4h26min04s |

CONCLUSÕES

A área entre as curvas dadas pelos algoritmos e a digitalização tida como verdade pode ser usada como estimativa de erro na avaliação da qua-

lidade das redes de drenagem geradas por programas comercialmente mais utilizados, como é o caso do ArcGIS® e do IDRISI®, bem como programas de uso menos difundido mas cuja distribuição é gratuita, no caso do TAS.

Como observado na Tabela 1, há grandes valores de áreas entre as curvas, porém não existem diferenças muito grandes nas áreas entre os algoritmos para o estudo feito no rio Purus, com exceção da comparação com a rede vetorial da ANA. Já para o rio Ituxi nota-se essa diferença e, com uma área entre as curvas de aproximadamente metade das obtidas pelos outros métodos, o algoritmo PFS do IDRISI® apresentou vantagem em relação aos demais.

Porém, com essa simples comparação, a veracidade dos resultados pôde ser contestada, uma vez que o traçado gerado pelo algoritmo pode não coincidir com o traçado tido como verdade, mas, por outro lado, pode passar dentro da calha do rio, o que não significa um erro da estimativa pelo método aplicado.

A alternativa adotada para uma correta comparação e confirmação dos resultados obtidos consistiu da aplicação de um buffer, correspondente à largura média do rio, em torno da linha digitalizada representativa da rede verdadeira e da contabilização apenas das áreas existentes entre o buffer e a linha da drenagem obtida por cada um dos métodos.

A mesma tendência observada antes da aplicação do buffer também foi verificada ao analisar as áreas entre o buffer e a curva do algoritmo, apresentadas na Tabela 3. Verificou-se uma redução aproximada de 99% nos valores das áreas entre as curvas (87% para o caso da comparação com a rede da ANA). Novamente, para o rio Purus, os valores das áreas entre as curvas são muito próximas (com um valor ligeiramente menor para o caso do algoritmo de Planchon e Darboux – TAS). Para o rio Ituxi verifica-se uma grande vantagem para o algoritmo PFS, onde o erro pela área é aproximadamente um sexto dos obtidos pelos demais métodos, mostrando que este método é o que melhor representa trechos de rios com larguras bem distintas em regiões planas.

Essa diferença notável presente apenas no Ituxi é explicada pela diferença de largura dos rios. Uma vez que o rio Purus é mais largo, ele dá uma margem muito grande para que o método encontre um caminho passando por células do MDE que compõem a largura do trecho de rio, ou seja, um caminho dentro da calha do rio. Já o rio Ituxi, por ser mais estreito, os erros são mais recorrentes, visto

que existem menos células do MDE compondo a sua largura.

É importante deixar claro que o tempo com que cada método executa suas operações (Tabela 4) não foi levado em consideração nas análises deste trabalho. Como a comparação consistiu de aplicações de algoritmos implementados em programas diferentes, tais algoritmos não devem ser classificados de acordo com esse tempo. A única comparação possível é entre os algoritmos de Jenson e Domingue e de Planchon e Darboux, ambos implementados no programa TAS, onde, Planchon e Darboux foi o mais rápido.

A utilização de um fator aleatório pelo algoritmo D8fa não justifica, necessariamente, o seu maior tempo de execução. O tempo elevado se deve a não otimização do código computacional desenvolvido em linguagem Fortran. O que caracteriza uma vantagem do D8fa em relação aos demais métodos que utilizam o algoritmo de Jenson e Domingues é a eliminação do aparecimento de drenagens paralelas (Paz et al., 2006).

Em todos os casos estudados a rede de drenagem disponibilizada pela ANA apresentou um erro maior que os obtidos pelos métodos estudados, o que demonstra uma maior dificuldade desta rede em representar adequadamente trechos de rios.

Os resultados deste trabalho mostraram que, em rios largos como o Purus, a tendência é de que todos os algoritmos gerem resultados semelhantes, com direções de escoamento que permitam a obtenção de uma rede de drenagem passando pela calha do rio na maior parte do seu comprimento. Porém, em rios mais estreitos, como o Ituxi, a drenagem gerada pelo algoritmo PSF presente no I-DRISI® foi a que mais se aproximou da drenagem tida como verdadeira com o buffer. Assim, de modo geral, dentre os métodos avaliados o Priority First Search (PFS) é o que melhor se aplica em regiões planas considerando rios com diferentes larguras, possibilitando drenagens mais coerentes e evitando drenagens paralelas.

REFERÊNCIAS

- ANA 2006. Topologia Hídrica: método de construção e modelagem da basehidrográfica para suporte à gestão de recursos hídricos. Versão 1.11, <http://www.ana.gov.br>.
- BURROUGH, P.A., MCDONNELL, R.A. 1998. Principles of Geographical Information Systems: Spatial Information Systems and Geostatistics. Oxford University Press. Oxford, 333 p.
- CALLOW, J.N., VAN NIEL, K.P., BOGGS, G.S. 2007. How does modifying a DEM to reflect known hydrology affect subsequent terrain analysis? *J. Hydrol.* 332, 30-39. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.06.020.
- COLLISCHONN, W. ; PILAR, J. V. 2000. A direction dependent least-cost-path algorithm for roads and canals. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 14, n. 4, p. 397-406.
- FAIRFIELD, J., LEYMARIE, P. 1991. Drainage networks from grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 27(5), 709-717, doi:0043-1397/91/90WR-02658.
- FARR, T. G., et al. 2007. The Shuttle Radar Topography Mission. *Rev. Geophys.*, 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.
- GARBRECHT, J., MARTZ, L.W. 1997. The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models. *Journal of Hydrology*, 193, 204-213.
- GONG, J., XIE, J. 2009. Extraction of drainage networks from large terrain dataset using high throughput computing. *Computers & Geosciences* Vol. 35 pp. 337-346.
- GRAHAM, S.T., FAMIGLIETTI, J.S., MAIDMENT D.R. 1999. 5-Minute, 1/2°, and 1° Data Sets of Continental Watersheds and River Networks for Use in Regional and Global Hydrologic and Climate System Modeling Studies. *Water Resources Research*, vol. 35(2), pp. 583-587.
- HUTCHINSON, M.F. 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, 106, 211-232.
- JENSON, S.K., DOMINGUE, J.O. 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 54(11), 1593-1600.
- JONES, R. 2002. Algorithms for using a DEM for mapping catchment areas of stream sediment samples. *Computers & Geosciences* Vol. 28 pp. 1051-1060.
- KENNY, F., MATTHEWS, B. 2005. A methodology for aligning raster flow direction data with photogrammetrically mapped hydrology. *Computers & Geosciences*, 31, 768-779.
- MARK D.M., 1984. Automated Detection of Drainage Networks from Digital Elevation Models. *Cartographica*, 21(2-3): pp. 168-178.
- MARTZ, L.W., GARBRECHT, J. 1999. An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM. *Computers & Geosciences* 25, 835-844.
- MENDES, C.A.B, CIRILO, J.A. 2001. Geoprocessamento em recursos hídricos: princípios, integração e aplicação. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 536 p.

- MIRANDA, J. I. 2005. Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 425 p.
- O'CALLAGHAN, J. F., MARK, D. M. (1984). The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 28(3), pp. 323-344.
- ORLANDINI, S., MORETTI, G. 2009. Determination of surface flow paths from gridded elevation data. *Water Resources Res.*, 45, W03417, doi:10.1029/2008WR007099.
- PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. 2007 River reach length and slope estimates for large-scale hydrological models based on a relatively high-resolution digital elevation model. *Journal of Hydrology*, Vol 343 pp. 127-139. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.06.006.
- PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; SILVEIRA, A. L. L. 2006 Improvements in large scale drainage networks derived from digital elevation models. *Water Resources Research* V.42 n. 8. doi:10.1029/2005WR004544.
- PAZ, A.R., COLLISCHONN, W., RISSO, A., MENDES, C.A. 2008. Errors in river lengths derived from raster digital elevation models. *Computers & Geosciences* (in press). doi:10.1016/j.cageo.2007.10.009.
- PAZ, A.R.; COLLISCHONN, W. 2008. Derivação de rede de drenagem a partir de dados do SRTM. *Rev. Geogr. Acadêmica* v.2 n.2 (viii.2008) 84-95.
- PLANCHON, O.; DARBOUX, F. 2001 A fast, simple and versatile algorithm to fill the depressions of digital elevation models. *Catena* 46 pp. 159-176.
- QUINN, P.; BEVEN, K.; CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. 1991. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, v. 5, 59-79.
- RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. 2003 The shuttle radar topography mission—a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 57 pp. 241– 262.
- RENNÓ, C.D.; NOBRE, A.D.; CUARTAS, L.A.; SOARES, J.V.; HODNETT, M.; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M.J. 2008 HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazônia. *Remote Sensing of Environment* Vol. 112 pp. 3469–3481.
- SEDGEWICK, R., 1992. Algorithms in C++. Addison-Wesley, Reading, MA.
- SEIBERT, J., MCGLYNN, B.L. 2007. A new triangular multiple flow direction algorithm for computing upslope areas from gridded digital elevation models. *Water Resources Research*, 43, W04501, doi:10.1029/2006WR005128.
- SOILLE, P., VOGT, J., COLOMBO, R. 2003. Carving and adaptive drainage enforcement of grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 39(12), 1366, doi:10.1029/2002WR001879.
- SUN, G.; RANSON, K. J.; KHARUK, V. I.; KOVACS, K. 2003 Validation of surface height from shuttle radar topography mission using shuttle laser altimeter. *Remote Sensing of Environment* 88 pp. 401–411.
- TARBOTON, D.G. 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, doi:0043-1397/97/96WR-03137.
- TEIXEIRA, A.A., HAUSCHILD, R.M.P.R., GODINHO, J.M., SILVA, M.A., SCHERER-WARREN, M., TRIGO, A.J., BORELLI, A.J., ARAÚJO JÚNIOR, G.J.L.D., PINTO, M.B.P., JÚNIOR, C.B. 2007. Construção de Base Hidrográfica Ottocodificada ao Milionésimo. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, XVII, 2007, São Paulo. Anais... São Paulo: Associação Brasileira de Recursos Hídricos. [CD-ROM].
- TIANQI, A., TAKEUCHI, K., ISHIDAIRA, H., YOSHITANI, J., FUKAMI, K. 2003. Development and application of a new algorithm for automated pit removal for grid DEMs. *Hydrological Sciences Journal* 48(6), 985-997.
- TURCOTTE, R., FORTIN, J.-P., ROUSSEAU, A.N., MASSICOTTE, S., VILLENEUVE, J.-P. 2001. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. *Journal of Hydrology*, 240, 225-242.
- VALERIANO, M.M.; KUPLICH, T.M.; STORINO, M.; AMARAL, B.D.; MENDES, J.N.; LIMA, D.J. 2006. Modeling small watersheds in Brazilian Amazônia with Shuttle Radar Topographic Mission - 90m data. *Computers e Geosciences*, 32(8): 1169-1181.
- WANG, L., LIU, H. 2006. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modeling. *International Journal of Geographical Information Science* 20(2), 193-213.
- ZHU, Q., TIAN, Y., ZHAO, J. 2006. An efficient depression processing algorithm for hydrologic analysis. *Computers & Geosciences*, 32, 615-623.

Comparison of Methods for Determining Flow Directions From Digital Elevation Models

ABSTRACT

Topographic representation on computers is increasingly used in hydrologic studies. Its application ranges from the simple definition of the basin area or of the watershed limits to the extraction of products for hydrological modeling. For this kind of application, one of the first steps

in the analysis of a Digital Elevation Model (MDE) is the definition of a flow direction matrix based on the matrix of elevations. To accomplish this task, the algorithm known as D8 is most frequently used, but the results depend on how flat areas and spurious depressions are treated in the matrix that represents the topography. This paper describes some of the most frequently used methods for determining the flow directions that are implemented in GIS computer programs, and analyzes their performances using a digital elevation model available on a global scale.

Keywords: *GIS, flow direction, drainage network, watershed.*