



Revista Brasileira de Cartografia (2012) N^o 64/5: 619-634
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE REDES DE DRENAGEM A PARTIR DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO

Automatic Drainage Network Extraction with Digital Elevation Models

**Darcy Carolina Jiménez Fernández¹; Márcio de Morisson Valeriano¹;
Hiran Zani¹ & Clódís de Oliveira Andrades Filho²**

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil.
djimenez@dsr.inpe.br; valerian@dsr.inpe.br; hzani@dsr.inpe.br

²Universidade de São Paulo – USP
Instituto de Geociências - IGc
CEP 05508-080 – São Paulo - SP, Brasil
andradesfilho@usp.br

Recebido em 29 de junho, 2011/ Aceito em 18 de setembro, 2011
Received on june 29, 2011/ Accepted on september 18, 2011

RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi estudar a interação das variáveis envolvidas no processo de extração automática de redes de drenagem a partir de modelos digitais de elevação (MDE). Para isto, foram usados os MDE de duas microbacias, de relevo de colinas convexas (Estado de São Paulo) e de depósitos aluviais de relevo plano e baixa amplitude (Estado de Rondônia), com dados do Banco Geomorfométrico do Brasil, Topodata, que advém do refinamento de dados SRTM. A extração automática foi feita utilizando o aplicativo SAGA GIS, que contém diversas opções de algoritmos para o cálculo da área de captação, variável que constitui o critério comum para iniciar o traçado automático das redes de drenagem. Os algoritmos aplicados foram D8, Dinf e DEMON. As redes geradas com estas metodologias mostraram-se correspondentes às redes usadas como referência em escalas relativamente generalizadas, o que sustenta a necessidade de edições posteriores baseadas na interpretação do próprio MDE e outras fontes de dados. Os resultados mostraram que estes algoritmos apresentam diferentes relações entre as características geomorfométricas da área analisada e os resultados de área de captação. Independente das diferenças nas áreas de captação calculadas, as linhas de drenagem resultantes foram muito semelhantes. Os resultados na área de relevo plano, originalmente menos correlacionados aos dados de controle, apresentaram uma expressiva melhora quando o MDE do Topodata foi preparado com filtragem média (3x3) previamente à extração automática. Entre as conclusões, ressalta-se que as características geomorfométricas da microbacia de interesse afetam distintamente o desempenho dos algoritmos de acordo com seu funcionamento, e, portanto, devem ser consideradas na escolha destes recursos.

Palavras chave: Algoritmos de Fluxo; Relevo; Área de Captação; Drenagem; SIG.

ABSTRACT

This paper aims at evaluating the interaction of the variables involved in the process of automatic drainage extraction with digital elevation models (DEM). For this, DEM from Topodata (Brazilian Geomorphometric Database) of two small watersheds located in Brazil, on terrains characterized by convex hills (State of São Paulo) and by alluvial deposits with gentle slopes and low elevation amplitude (State of Rondônia), were analyzed. Different flow algorithms, for the calculation of caption area, the common criterion for stream initialization, were implemented in SAGA GIS software. The evaluated algorithms were Deterministic Eight Directions (D8), Deterministic Infinity Directions (Dinf) and Digital Elevation Model Networks (DEMON). The extracted drainage networks showed correspondence with the reference in relatively generalized scales, sustaining the need for further manual editions, based on interpretations of either the input DEM itself, or other data sources. Results showed the studied algorithms to express distinct relations between geomorphometric characteristics of the analyzed watershed and the respectively calculated caption area. Regardless of the calculated caption area differences, the resulting stream locations were similar among algorithms. On plain relief, where original results were less correlated to reference networks, results were significantly improved when Topodata DEM was prepared with mean filter (3x3) previously to drainage extraction. Among the conclusions, we emphasize that the geomorphometric characteristics of the analyzed area distinctly affect the extraction performance according to the algorithm functioning and thus should be accounted for in the selection of these resources.

Key words: Flow Algorithms; Topography; Catchment Area; Drainage; GIS.

1. INTRODUÇÃO

O processo automático de extração de redes de drenagem tem sido intensamente estudado nos últimos tempos com a disponibilização de modelos digitais de elevação (MDE) em formato digital (METZ et al., 2011; RAHMAN et al., 2010; JESUS, 2009; COLOMBO et al., 2007; CHARLEUX-DEMARGNE; PUECH, 2000). Neste procedimento é necessário considerar as variáveis intervenientes no processo, desde o dado utilizado, algoritmos de fluxo, parâmetros de operação, por fim, as características geomorfométricas das microbacias (MB), a fim de se obter redes mais próximas da realidade.

O método mais comum para a extração automática de drenagens é baseado na estimativa da área de captação. Área de captação (também denominada fluxo acumulado, área de contribuição, área a montante ou área de acumulação) é definida como a somatória das áreas superficiais de todas as células, cujo escoamento contribui para o ponto em questão (FERN et al., 1998; JENSON; DOMINGUE, 1998; COSTA-CABRAL; BURGESS, 1994; FERRERO, 2010). Para este cálculo existem diversos algoritmos, chamados *algoritmos de fluxo*, comumente presentes em sistemas de informação geográfica (SIG), entre os quais o Determinístico de Oito Direções (D8) (O'CALLAGHAN; MARK, 1984), Determinístico de Infinitas Direções (DInf) (TARBOTON; BRAS, 1991) e Digital Elevation Model Networks

(DEMON) (COSTA-CABRAL; BURGESS, 1994). Cada um destes algoritmos estima as direções de fluxo para o cálculo das áreas acumuladas com sucessivas passagens de janelas móveis de tamanho 3x3, em que se considera a maior declividade de seus vizinhos. O valor da área de captação é confrontado com um limiar, que representa a área mínima necessária para a definição de um canal, a partir do qual as linhas de drenagem são iniciadas. O valor do limiar, portanto, influencia diretamente a densidade da rede de drenagem definida. Assim, altos valores de limiares geram redes de drenagens menos densas e valores menores produzem redes de drenagem com maior densidade de segmentos. Além dos elementos anteriormente discutidos, o tipo de dado utilizado, o nível de processamento e a complexidade topográfica da área analisada são outros fatores que influenciam nas redes de drenagens extraídas (LOPEZ; CAMARASA, 1999; KENWARD, 2000; YANG et al., 2001; GUO-AN et al., 2001; RAHMAN et al., 2010). Para conhecer sua influência nos resultados como base para o desenvolvimento metodológico de geração de linhas de drenagem com SIG, este trabalho objetivou caracterizar a influência destes elementos (i.e. dado, algoritmo e relevo) no processo de extração automática de redes de drenagem a partir de modelos digitais de elevação.

2. MATERIAL E MÉTODOS

MDE de duas microbacias localizadas em áreas de características geomorfológicas distintas, foram submetidos à extração automática da drenagem pelos algoritmos de fluxo D8, Dinf e DEMON. O processo de extração foi realizado com o aplicativo SAGA GIS, disponível gratuitamente na Internet (<http://www.saga-gis.org/en/index.html>). Para avaliação da qualidade das redes de drenagem extraídas, foram extraídos parâmetros quantitativos tanto das redes extraídas como das redes de drenagem de referência para sua avaliação, além da sobreposição de ambas as redes para análise visual (Figura 1).

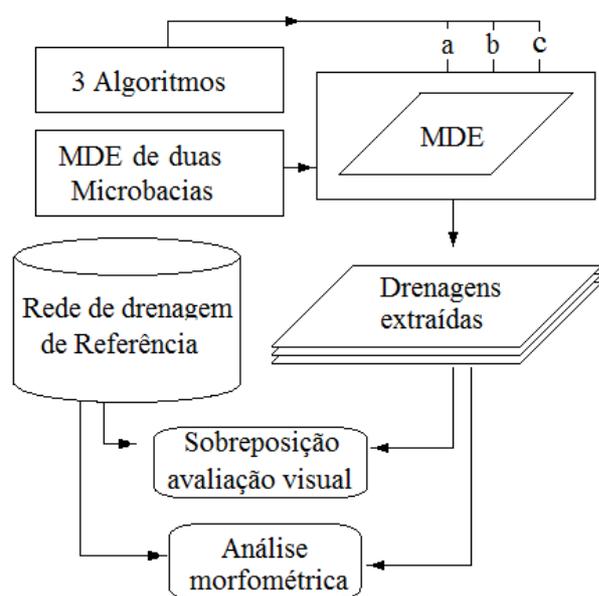


Fig. 1 - Esquema metodológico utilizado.

2.1 Dados

Os MDE utilizados neste trabalho, referidos por Topodata (VALERIANO, 2008), se referem a um refinamento dos dados SRTM (versão 1, 3"), da resolução espacial original de 3 segundos de arco (~ 90 m) para 1 segundo de arco (~ 30 m) com técnicas de geoestatística (VALERIANO; ROSSETTI, 2011). Estes dados têm as mesmas especificações cartográficas dos dados SRTM, exceto a resolução espacial e vertical, interpoladas, e foram coletados em formato *GeoTIFF* no endereço eletrônico www.dsr.inpe.br/topodata.

O material cartográfico utilizado como dado de referência para a microbacia de São Paulo (MB1) foi a rede de drenagem do Estado de São Paulo na escala 1:50.000. Esta rede de drenagem foi extraída da base cartográfica digital, elaborada pelo Instituto

Geográfico e Cartográfico de Estado de São Paulo - IGC. Foram produzidas pelo IGC por vetorização das folhas topográficas do mapeamento sistemático 1:50.000, com especificações técnicas e de imagens referenciadas dos fotolitos originais. Para a microbacia de Rondônia (MB2), a rede de referência utilizada foi gerada por Bertani (2011). As metodologias usadas para gerar esta rede combinam informações provenientes de diferentes dados disponíveis. Estes dados foram planos de informação pré-existent correspondentes a vetores de cartas topográficas na escala 1:100.000 (usada como referência) e dados de sensoriamento remoto (incluindo SRTM) para correção destes vetores e criação de novos segmentos.

Além dos testes sistemáticos, um estudo conduzido sobre a preparação do MDE revelou a conveniência de uma suavização, prévia ao processamento principal, nos dados da área da microbacia 2 (RO). Esta suavização foi feita com aplicação de técnica conhecida como filtragem média (EASTMAN, 2006), em que as cotas originais são substituídas pela média das cotas posicionadas dentro de um determinado raio. No presente caso, a média de 9 cotas (filtro de 3 linhas por 3 colunas) foi suficiente para promover uma expressiva melhoria na extração da drenagem.

2.2 Recursos de análise

Para este trabalho foram usados os aplicativos: Global Mapper v11.01 (Global Mapper Software LLC, 2002) para conversão de formatos compatíveis entre os pacotes utilizados; ArcGIS Desktop 9.3.1 (ESRI, 2009) para pré-processamento dos dados; IDRISI ANDES 15 (EASTMAN, 2006) na filtragem dos dados para microbacia 2 e finalmente SAGA 2.0.5 (BÖHNER; CONRAD, 2010) para extração automática das redes de drenagem. Além destes recursos específicos, foram também utilizados programas para manipulação geral de dados e cálculo de parâmetros quantitativos, como planilhas eletrônicas, pacotes gráficos e editores diversos.

2.3 Áreas de estudo

2.3.1 Ribeirão Bonito (MB1)

Está localizada no Estado de São Paulo, abrangendo os municípios de São Carlos, Rio Claro, Dourado, Ribeirão Bonito e Brotas. Esta microbacia é afluente do rio Jacaré-Pepira da bacia hidrográfica

Jacaré-Tietê (Figura 2). Regionalmente, a área está inserida na unidade morfoestrutural Bacia Sedimentar de Paraná e na unidade morfoescultural do Planalto Ocidental Paulista, dentro da unidade geomorfológica do Planalto Residual de São Carlos. Composta por colinas com topos convexos e tabulares em função das variações litológicas e vales medianamente entalhados, apresenta formas de dissecação média e vales entalhados (ROSS; MOROZ, 1997). Está inserida na unidade geotectônica Bacia de Paraná, caracterizada nesta região por rochas pertencentes ao Mesozóico. Litologicamente é representada por arenitos finos a médio, avermelhados, arenitos eólicos avermelhados e rochas vulcânicas toleíticas, intercalados com arenitos, correspondentes ao Grupo São Bento (IPT, 1981). A vegetação da região encontra-se incluída no domínio de floresta tropical semidecidual da Bacia do Paraná, nos terrenos de basalto (ROSS, 2006), onde predominam Latossolos Vermelho-escuros. O clima da região é classificado como Cwa segundo Koeppen, isto é, subtropical mesotérmico, úmido, com chuvas de verão e com estiagem branda no inverno. A estação chuvosa se estende de outubro a março e a estação seca de abril a setembro. Há ocorrência esporádica de geadas (PINTO; CRESTANA, 1998).

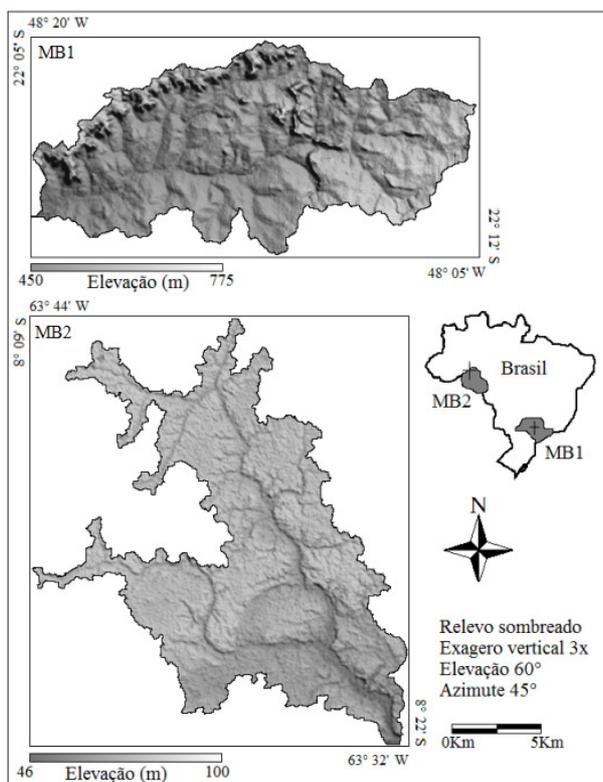


Fig. 2 - Áreas de estudo.

2.3.2 Porto Velho (MB2)

Localiza-se no Estado de Rondônia na região norte do Município Porto Velho, mais especificamente na margem esquerda do Rio Madeira (Figura 2). Pertence à sub-bacia do Rio Madeira, no curso médio-baixo do rio. Nesse trecho, o rio drena áreas de sedimentos terciários da Formação Solimões. Na região, é notória a presença de várzeas de alagamento diques marginais e canais abandonados. Regionalmente, esta microbacia encontra-se na unidade geomorfológica Depressão Ituxi-Jari, correspondente ao domínio morfoestrutural de Bacias Sedimentares e Cobertas Inconsolidadas. Predominam formas de dissecação homogênea ou diferencial. A área está caracterizada por um conjunto de formas de relevo de topos tabulares, conformando feições de rampa suavemente inclinadas e lombas esculpidas em coberturas sedimentares inconsolidadas, denotando eventual controle estrutural (IBGE, 2010). A Floresta Ombrófila Aberta Aluvial ocorre ao longo das planícies de inundação dos rios e igarapés que, em geral, apresentam forte sazonalidade de vazão. As comunidades presentes nessas áreas variam em sua fisionomia e composição florística de acordo com o período de inundação a que estão expostas (IBGE, 2010). Predominam Neossolos flúvicos de textura variável, relacionada com o tipo de unidade fisiográfica onde são encontrados (e.g. diques marginais, várzeas, canais abandonados e praias). Os Neossolos soterram mantos de Cambissolos e/ou Argissolos concrecionários lateríticos, apresentando também plintitos vermiformes típicos de evolução em altos estruturais (SOUZA; JIMÉNEZ, 2007). O clima característico da região é do tipo Equatorial Úmido, do domínio de Floresta do tipo Hiléia. Pela classificação de Köppen, corresponde ao clima Am, com elevadas precipitações, compensando as correspondentes estações secas. A umidade média relativa anual varia localmente de 80% a 90%. A temperatura média anual fica em torno dos 25°C, com mínimas e máximas de 15°C e 31°C, respectivamente (SILVA FILHO *et al.*, 2003).

2.4 Extração das redes de drenagem

A extração das redes de drenagem foi executada em sessões do aplicativo SAGA sobre os dados topográficos disponíveis (Figura 3).

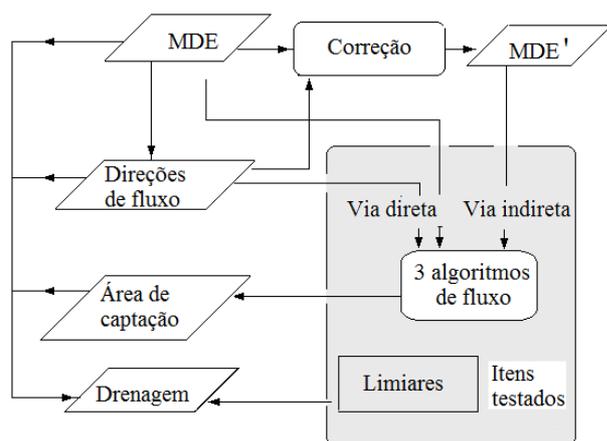


Fig. 3 - Procedimento executado para extrair as redes de drenagem.

Previamente aos processos de geração das redes de drenagem foi necessário um pré-processamento para todos os dados. Para todas as microbacias, o pré-processamento consistiu em calcular as direções de fluxo (*Sink Drainage Route Detection*) a partir do MDE original e sua aplicação para correção (*Sink Removal*) do MDE original, com a criação de um modelo corrigido (MDE'). O aplicativo SAGA contém duas formas de extrair a rede de drenagem, uma via direta e outra indireta (Figura 3). As duas diferem no modo de calcular a área de captação. Para a via indireta, somente o MDE' é utilizado para cálculo de área de captação, enquanto que o MDE original e o plano de direções constituem os dados de entrada para cálculo da área de captação pela via direta. O cálculo das áreas de captação foi realizado dentro do módulo *Terrain Analysis Hydrology Catchment Area*.

Nesta etapa foram realizados procedimentos diferenciados para a microbacia MB2 em relação a MB1. No caso de MB1 os MDE ? aplicados pela via direta foram mantidos. Problemas encontrados nos testes preliminares para a MB2 levaram à adoção da via indireta para esta microbacia.

Independentemente da via adotada no cálculo da área de captação, os dados de entrada para o módulo *Terrain Analysis Channel Channel Network* são o MDE corrigido (MDE'), a indicação do limiar e de sua relação ("maior" ou "maior ou igual") com este critério, para determinar o início do traçado das redes de drenagem. Foi indicada a relação 'maior do que' (referente ao limiar) para determinar a pertinência de cada ponto à rede de drenagem. Foram experimentados os algoritmos

D8, Dinf e DEMON, que perfazem a acumulação dos fluxos para o cálculo da área de captação.

O último parâmetro (o mais extensivamente testado) foi o próprio limiar de área de captação, avaliado com base em parâmetros quantitativos e qualitativos de cada uma das redes extraídas em relação à referência e por sobreposição das mesmas para análises visuais e em SIG para verificar sua correspondência.

Desta forma, foram geradas seis grades de fluxo acumulado e suas redes de drenagem correspondentes, três para cada microbacia. Os parâmetros utilizados na avaliação destes testes foram número de segmentos (Ns), comprimento total dos rios (Ct), densidade de drenagem (Dd) (CHRISTOFOLETTI, 1980) e análise visual das redes (de referência e experimental) sobrepostas.

2.5 Avaliação dos resultados

Inicialmente, em cada teste, foi realizada a análise visual das redes experimentais sobrepostas às redes de drenagem de referência para uma primeira seleção do universo de resultados possíveis. Posteriormente, a avaliação quantitativa da qualidade posicional das redes experimentais de melhor correspondência foi baseada em valores de distância de deslocamento. Isto foi calculado a partir de mapas de distância criados a partir das redes de referência, a fim de estimar erros de posicionamento das redes geradas em relação a estas. Outra medida de exatidão foi obtida por tabulação cruzada das redes obtidas por cada um dos algoritmos e sua respectiva referência. Esta avaliação, feita com base na estimativa dos erros de omissão e comissão das redes rasterizadas (matriciais ?) na resolução do MDE, foi feita como forma a simular o exame ponto-a-ponto da correspondência entre as classes "drenagem" e "não-drenagem".

Além das avaliações diretas descritas acima, os resultados foram submetidos a uma avaliação funcional, em que se fizeram análises das drenagens experimentais e seus resultados comparados aos atributos correspondentes da referência. Nesta modalidade de avaliação, foram considerados o número de segmentos (Ns), o comprimento total dos rios (Ct) e a densidade de drenagem (Dd).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Área de captação

Foram extraídas as áreas de captação para ambas as microbacias com os três algoritmos de fluxo (Figura 4). Conforme os resultados apresentados nesta figura, é possível observar que os valores mais elevados de área de captação correspondem às posições dos canais principais, como esperado, que se correspondem com as possíveis áreas de ocorrência de drenagens. Observa-se uma variação no padrão de distribuição dos níveis intermediários de valor de área de captação apresentados em diferentes tons de cinza entre os testes, conforme as características

morfométricas de cada microbacia, assim como entre os algoritmos testados. Assim, os padrões mais homogêneos são verificados nas bacias com relevos mais diferenciados, de topos agudos e os mais heterogêneos nos relevos de suaves a planos, com topos convexos. Estes resultados mostram a influência das características do relevo de cada área sobre o cálculo da área de captação, o que tem implicações diretas na escolha dos limiares para extração automática da drenagem. Por outro lado, as áreas de captação estimadas pelos algoritmos Dinf e DEMON (Figura 4 B,C,E,F) produziram imagens mais suavizadas, o que poderia indicar uma distribuição mais uniforme, de acordo com o funcionamento destes algoritmos. Segundo Cano

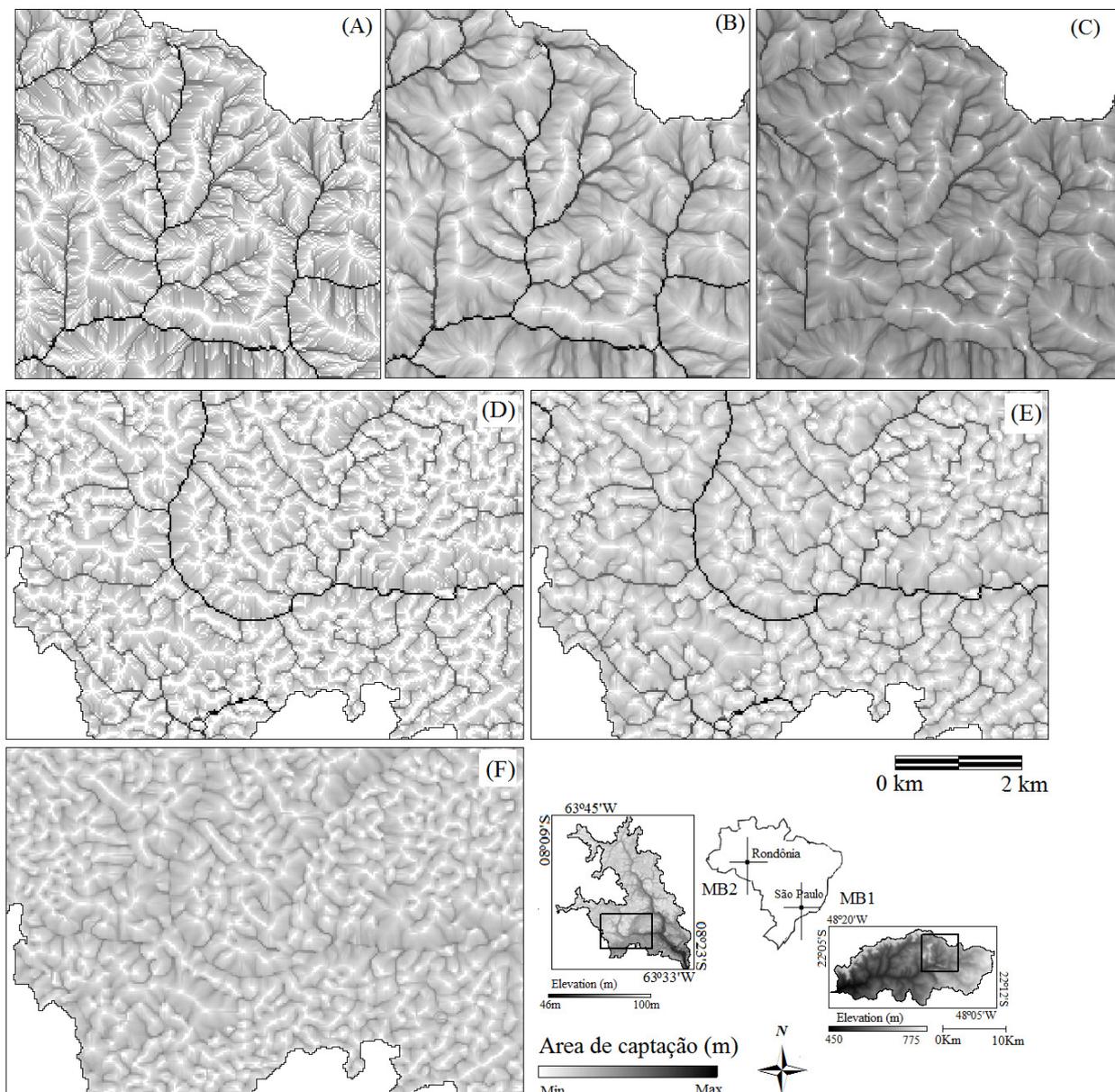


Fig. 4 - Detalhes de área de captação para MB1 (A, B, C) e MB2 (D, E, F). (A, D) Área de captação usando o algoritmo de fluxo D8, (B, E) usando Dinf e (C, F) DEMON.

(2005), esta diferença é produto do efeito dispersivo do fluxo que caracteriza o algoritmo Dinf, verificado quando o fluxo de água é repartido ao longo da microbacia (Figura 4: toda ela?), e resulta em uma maior quantidade de células com área de acumulação superior à obtida pelos algoritmos D8 e DEMON. Este efeito é mais notável em zonas próximas a nascentes e vertentes.

A Tabela 1 mostra os valores máximos de área de captação obtidos para cada uma das microbacias estudadas com cada algoritmo de fluxo.

Tabela 1 - Valores de área de captação (km²)

	D8	Dinf	DEMON
MB1	21,21	22,16	0,2
MB2	0,001	1087,62	0,5

Nesta tabela se observa que os maiores valores de área de captação foram produzidos com a aplicação do algoritmo Dinf, conforme ilustrado na Figura 4 (B, E).

3.2 Redes de drenagem

As redes de drenagem extraídas automaticamente para área MB1 estão ilustradas na Figura 5 (linha preta mais espessa), segundo o tipo de algoritmo de fluxo aplicado (D8, Dinf e

DEMON), sobrepostas as respectivas redes de referência (linha cinza clara).

Os maiores erros estão posicionados nas nascentes dos rios, ainda que o limiar selecionado foi o que apresentou melhor ajuste. Segundo Cano (2005), a presença deste tipo de erro, especificamente nas nascentes e vertentes, pode ser devido à pouca área considerada para o cálculo da área da captação.

Na Figura 6 estão representados os detalhes da Figura 5. Nesta figura se observam a perda de sinuosidade no traçado das linhas de drenagem em comparação com a rede de referência (Figuras 6A, 6B, e 6C), erros posicionais e omissão de canais de primeira ordem, principalmente (Figuras 6A (2-3), 6B (2-3) e 6C (2-3)). Como pode se observar, estes erros foram registrados com todos os algoritmos aplicados, estando estes possivelmente relacionados com a resolução do MDE utilizado. Macmaster (2002) avaliou o efeito da resolução do MDE sobre ou na posição das redes de drenagens extraídas automaticamente, verificando que a exatidão no posicionamento das redes extraídas diminui à medida que a resolução do dado é menor. Com isto, este autor sugere que a dimensão das células do MDE deve corresponder a uma fração

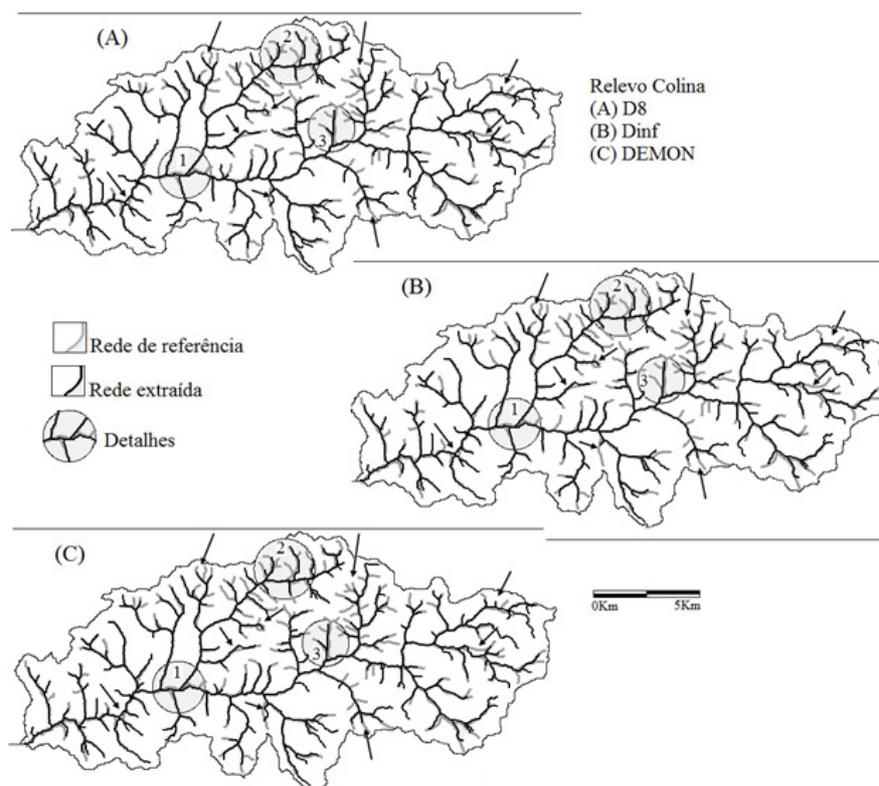


Fig. 5 – Redes de drenagem extraídas para MB1 sobrepostas com a referência. Foram usados três algoritmos de fluxo: (A) D8, (B) Dinf e (C) DEMON. Setas indicam erros nas redes extraídas em relação à de referência.

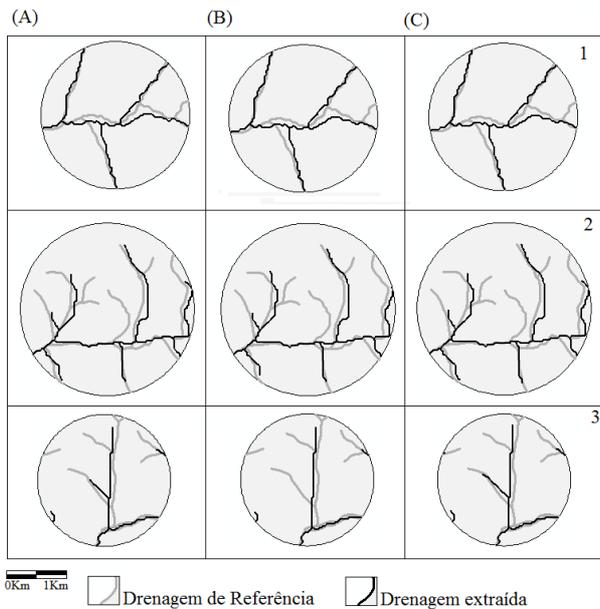


Fig. 6 – Detalhes (1, 2 e 3) realçados em cinza claro na Figura 5. Estão representados resultados dos algoritmos (A) D8, (B) Dinf e (C) DEMON.

do comprimento das vertentes em aplicações de modelagem hidrológica.

A Tabela 2 mostra os parâmetros quantitativos considerados para a avaliação do limiar mais adequado para o processo de extração automática na MB1. Com base nesta tabela, pode-se observar que o algoritmo de fluxo que gerou redes mais próximas da referência foi o DEMON.

Tabela 2 - Avaliação do limiar para MB1

Parâmetros	REF	D8	D_INF	DEMON
Ns	326	307	260	305
Ct	245,68	240,22	220,33	236,89
Dd	0,79	0,84	0,82	0,78

Onde ns: numero de segmentos, ct (km): comprimento total dos rios, dd(km/km²): densidade de drenagem e ref: referência.

As linhas de drenagem, obtidas para MB2, utilizando o MDE original e filtrado, estão ilustradas na Figura 7. Como se observa nesta figura, a aplicação do filtro no MDE Topodata favoreceu o traçado contínuo de linhas de drenagem (Figura 7B), que aparecem interrompidas quando não se toma esse cuidado (Figura 7A). Neste caso particular com relevo plano, observou-se que, quando os dados originais são usados para extrair a rede de drenagem, são criadas drenagens descontínua e fragmetada em grande quantidade de segmentos

isolados (Figura 7, A.1 e A.2). Uma vez que a filtragem é realizada, as linhas criadas apresentam mais continuidade (Figura 7, B.1 e B.2) e maior coerência em comparação com a rede de referência. Além desta melhora, os parâmetros estimados ficam mais próximos da referência (Tabela 3). São reconhecidas as limitações para modelagem hidrológica com MDE de dados de radar em relevo plano, agravados por cobertura florestal densa, como na Amazônia, o que tem motivado o desenvolvimento de intervenções sobre o MDE (GETIRANA et al., 2009).

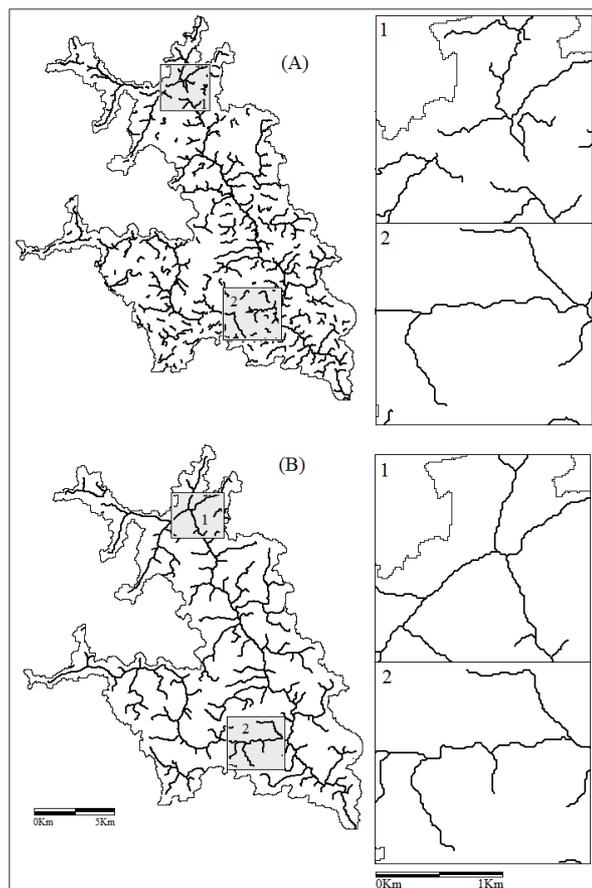


Fig. 7 - Testes de filtragem para MB2. (A) Extraída do MDE original e (B) rede do MDE filtrado. Os quadros em cinza são detalhes 1 (norte da MB) e 2 (sul da MB).

Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros considerados para avaliar as redes de drenagem mostradas na Figura 7. Estes parâmetros confirmaram que o dado filtrado resulta em uma rede de drenagem de maior coerência, com relação à referência adotada. Neste teste, observou-se que o número de segmentos gerados com o dado original (O) foi de 443, o dobro em relação ao dado filtrado (F). Por outro lado, após a aplicação do filtro no

DEM, o número de segmentos diminui para 219, próximo ao valor da rede de referência. Esse comportamento foi observado no Ct e na Dd, o que indica uma melhoria expressiva para os resultados.

Tabela 3 - Avaliação do limiar para MB2

Parâmetro	R	O	F
Ns	215	443	219
Ct	218,63	337,33	249,54
Dd	1,03	1,6	1,18

Onde: ns: numero de segmentos, ct (km): comprimento total dos rios, dd (km/km²): densidade de drenagem e r: referência, o: original e f: filtrada

A Figura 8 apresenta as redes de drenagem extraídas para MB2, obtidas com limiar de 0,4 km² (~444 células). Foram realizados mais testes para estabelecer o limiar ideal, segundo os parâmetros quantitativos (Tabela 4) e sobreposição das redes geradas com a referência (GARDNER, 2008). Ainda na Figura 8, estão envolvidos em uma elipse cinza claro os detalhes apresentados na Figura 9, que mostram os erros observados também nas redes obtidas para MB1 (Figuras 5 e 6).

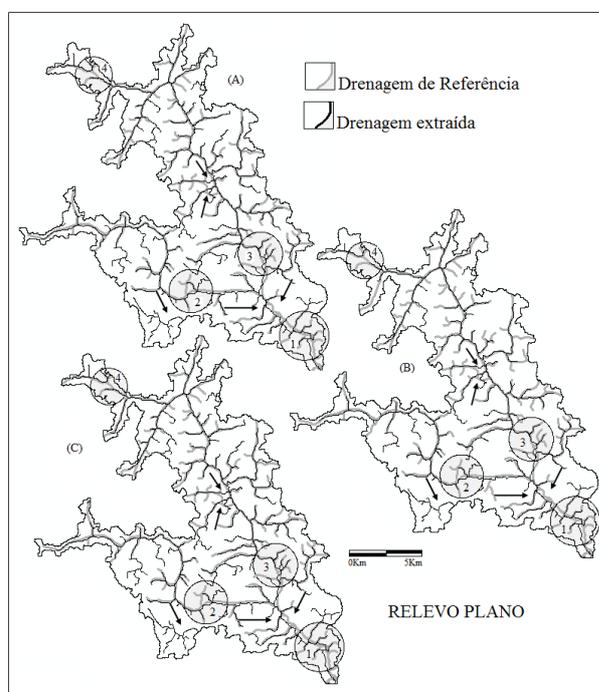


Fig. 8 – Redes de drenagem extraídas para MB2 sobrepostas com a referência; algoritmos de fluxo: (A) D8, (B) Dinf e (C) DEMON. Setas indicam locais de erros nas redes extraídas com relação à referência.

Neste caso (Figuras 8 e 9) são mais notáveis os deslocamentos das redes extraídas, assim como a criação de segmentos inexistentes e a modificação (positiva ou negativa) da sinuosidade dos canais. A semelhança das redes de drenagem está relacionada com as características da MB2, particularmente seu relevo plano, permitindo que os algoritmos de fluxo simples, como D8 (TARBOTON, 1997; LAM, 2010; PELLETIER, 2008; JIMÉNEZ FERNANDEZ *et al.*, 2011) produzam resultados satisfatórios para escalas não detalhadas (Figura 5 e Figura 8).

São apresentados na Tabela 4 os parâmetros derivados das redes obtidas e da referência. Nesta se observa que os valores obtidos com os algoritmos utilizados são muito próximos do valor de referência quando o mesmo limiar é usado. Segundo Lopez e Camarasa (1999), os métodos de extração automática das redes de drenagem dependem em grande parte da definição do limiar apropriado (i.e. mínimo de células requeridas para formar um canal). Os mesmos autores concluíram em seu estudo que este número é dependente das feições geomorfológicas da bacia de drenagem estudada. Portanto, o método mais adequado consiste na aplicação de limiares diferentes em cada setor, segundo as características do relevo (LOPEZ; CAMARASA, 1999; LIN *et al.*, 2006).

Tabela 4 - Parâmetros considerados nas redes de drenagem da MB2

Parâmetros	REF	D8	D_INF	DEMON
Ns	215	219	173	225
Ct (km)	218,63	249,546	207,219	252,405

Onde: Ns: numero de segmentos, ct (km): comprimento total dos rios, dd (km/km²): densidade de drenagem e ref: referência.

A comparação das densidades de drenagem das redes derivadas com as respectivas referências (Figura 10), mostra uma correspondência parcial, quando os dados quantitativos são observados isoladamente (Tabela 5). Na Figura 10 tem-se que para MB1 é possível que tenha ocorrido (o quê?), sendo o algoritmo que chegou mais próximo da densidade de drenagem de referência foi o D8, seguido pelo DEMON e, por último, o algoritmo Dinf.

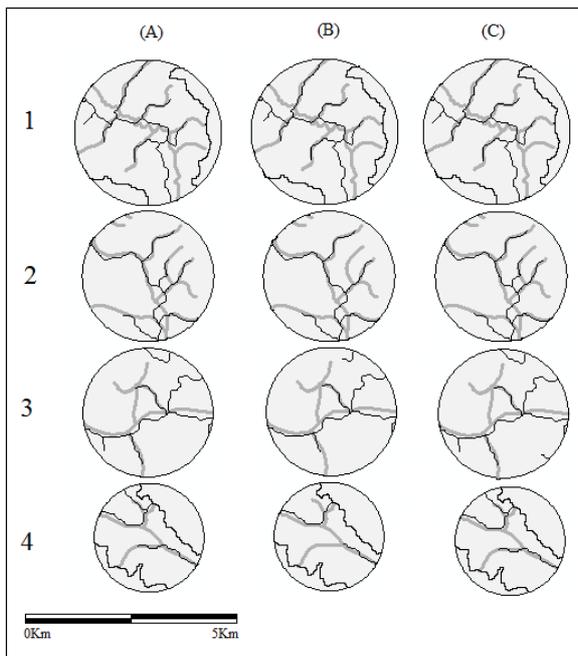


Fig. 9 – Detalhes realçados na Figura 8. (A) rede obtida usando o algoritmo D8, (B) usando Dinf e (C) usando DEMON. Escala 1:100.000.

A ocorrência de subestimação da densidade de drenagem em MB1 (Figura 10) pode ser decorrente das características da microbacia (MB1), que é favorável para o desenvolvimento de fluxos convergentes, estes sendo facilmente modelados pelos algoritmos de fluxo simples como o D8. Observando os valores obtidos na Tabela 5, observa-se que as diferenças entre as densidades estimadas para as diferentes redes são muito próximas, sendo para MB1 o melhor resultado foi obtido com o algoritmo D8 e para MB2 com o algoritmo Dinf.

Após a sobreposição das redes de drenagem, variados graus de deslocamento foram observados quando visualizados em detalhe. Junto com deslocamentos, a porcentagem de erros e de acertos foi avaliada conjuntamente, conforme se descreve a seguir.

3.3 Avaliação dos resultados

Na Figura 11 são apresentados os erros e acertos estimados para as redes de drenagem extraídas em cada uma das microbacias com os diferentes algoritmos. A Figura 11(A) representa os acertos obtidos, ou seja, a porcentagem de células da drenagem de referência identificadas como tal no processo de extração. Em geral observou-se melhor desempenho do algoritmo DEMON para as microbacias analisadas. Os maiores acertos em

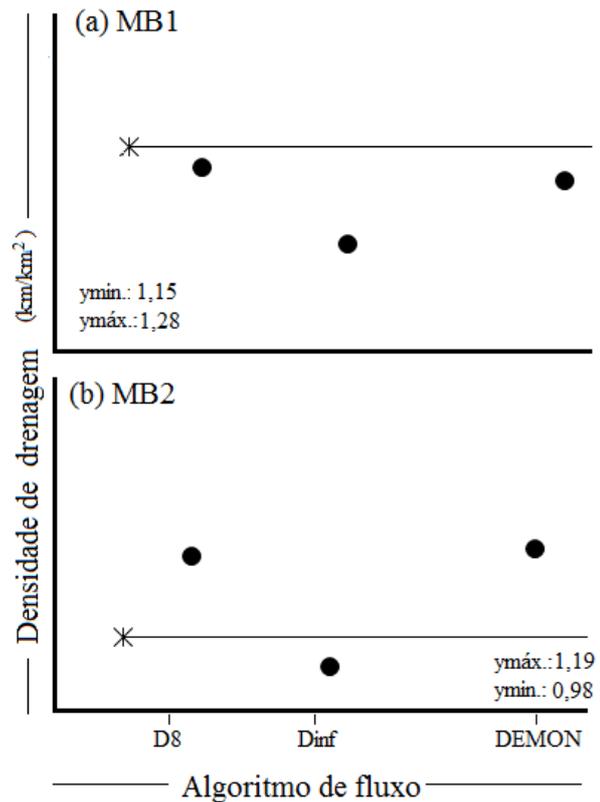


Fig. 10 – Densidade de drenagem obtida para as redes de drenagem extraídas (pontos) e a respectiva referência (linha contínua). (a) MB1 e (b) MB2.

Tabela 5 – Densidades de drenagem (km/km²) para as microbacias analisadas

Microbacias	REF	D8	D_INF	DEMON
MB1	1,28	1,26	1,15	1,23
MB2	1,03	1,18	0,98	1,19

ambas as microbacias foram obtidos quando este algoritmo (DEMON) foi usado, com acertos de 15,10% e 40,34% para MB1 e MB2 respectivamente. Para MB1 o desempenho dos algoritmos de fluxo D8 e Dinf foram os mesmos, obtendo-se valores de acerto muito próximos entre si (Tabela 6), com resultados idênticos para os algoritmos D8 e Dinf (Tabela 5). Isto sugere que o desempenho do algoritmo variou de acordo com as características da microbacia. Porém, o maior acerto, especificamente, nesta microbacia deve-se provavelmente à origem de sua rede de referência, compilada a partir de dados diversos, apoiados essencialmente sobre uma drenagem inicial, extraída de mapas e de dados SRTM (BERTANI, 2011).

Para MB2 verificou-se que os erros de omissão foram maiores quando o algoritmo de fluxo Dinf foi utilizado, chegando a 65,33% (Tabela 6).

Por outro lado, os erros de comissão maiores foram atribuídos ao algoritmo de fluxo DEMON, como pode se observar ressaltado em negrito na Tabela 5. Costuma-se explicar a baixa correspondência atingida nestes processos pelo fato de não se incluírem aspectos dinâmicos envolvidos no sistema de drenagem, (LOPEZ; CAMARASA, 1999; HANCOCK, 2006; LIN, 2006), assim como a variabilidade espacial de atributos do terreno. Porém, deve-se ponderar o grau de expressão da drenagem no relevo e a fidelidade de seu registro no MDE como parcelas de perda da informação prévias ao desempenho do algoritmo. No primeiro degrau de perda cita-se, por exemplo, a fraca expressão da drenagem em terrenos planos. Na segunda parcela, citam-se as limitações do MDE para a representação das feições de drenagem expressas na topografia de fato, dadas pela sua resolução, pela fonte de dados altimétricos e os métodos usados para seu levantamento, diretos ou remotos.

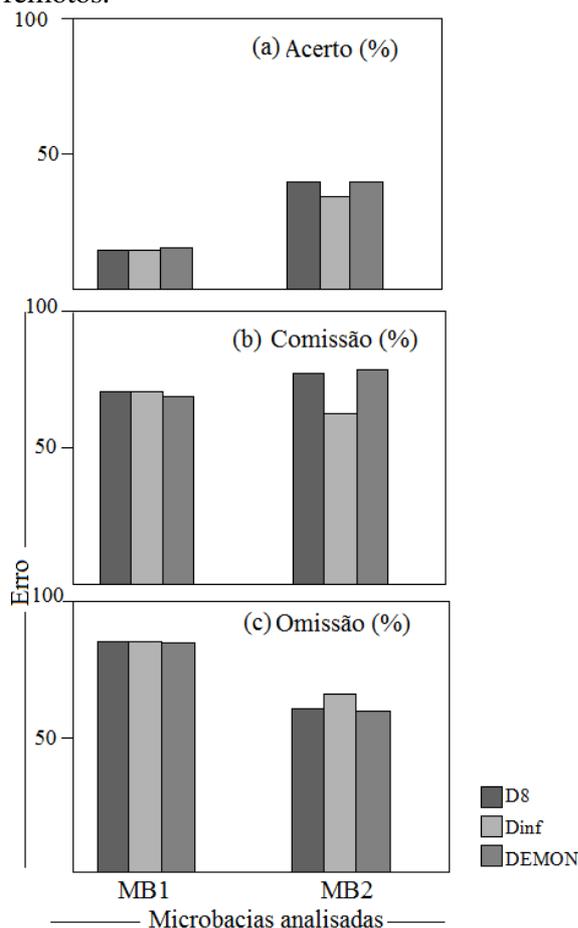


Fig. 11 – Erros calculados nas redes de drenagem extraídas em cada uma das MBs com cada um dos algoritmos de fluxo utilizados. (a) total de acertos, (b) erros de comissão e (c) erros de omissão.

Tabela 6 – Porcentagens (%) de erros e acertos em cada microbacia usando os algoritmos de fluxo

		D8	Dinf	DEMON
	O	85,2	85,2	84,9
MB1	C	70,41	70,41	68,79
	A	14,8	14,8	15,1
	O	59,83	65,33	59,66
MB2	C	77,1	62,28	78,29
	A	40,17	34,67	40,34

Onde: C: erro de comissão (%) O: erro de omissão (%) e A: acerto (%).

Na Figura 12 estão apresentadas as medidas de deslocamentos máximos obtidos nas redes extraídas em relação à referência. Para a MB1, os deslocamentos observados foram menores do que para a MB2, independentemente do algoritmo aplicado. Os maiores deslocamentos foram encontrados na MB2, nos casos em que os algoritmos D8 e DEMON foram utilizados, e menores para as redes de drenagem produzidas com o algoritmo Dinf. O valor máximo, como apresentado na Tabela 7, correspondeu a 3481,82m, enquanto o mínimo (das distâncias máximas) foi de 1262,58m.

A figura 12 mostra os valores de deslocamento obtidos para as microbacias estudadas. No caso da figura 12 (A), estes valores

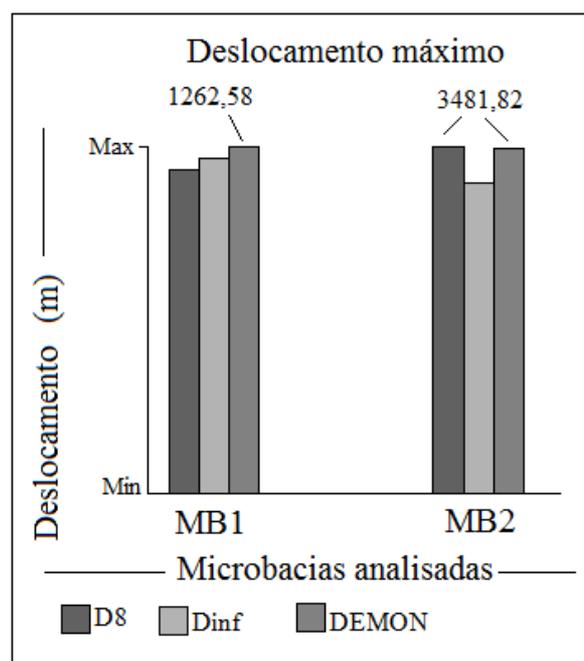


Fig. 12 - Deslocamentos apresentados pelas redes extraídas em relação às redes de referência.

representam a distância máxima de deslocamento obtida para cada rede de drenagem gerada com cada um dos algoritmos de fluxo para cada MB.

Na MB1, os valores de deslocamento em relação à referência foram menores quando aplicados os algoritmos D8 e Dinf e maiores no caso em que DEMON foi utilizado para extrair as redes de drenagem (Tabela 7).

Tabela 7 – Deslocamentos máximos (m) calculados para as redes extraídas automaticamente com os algoritmos de fluxo nas duas MB

	MB1	MB2
D8	1198,07	3481,82
Dinf	1238,07	3122
DEMON	1262,58	3481,82

Foram apresentadas as redes de drenagem com maior compatibilidade em relação à referência (Figura 13). Para se obter estas redes de drenagem, os testes foram feitos com avaliações visuais na escala de 1:100.000. Consideraram-se como mais próximas da realidade aquelas que apresentaram os maiores acertos, menor deslocamento, correspondência segundo análise visual e cujos parâmetros resultassem numericamente compatíveis com aqueles da rede de referência. Assim, para ambas MB, o algoritmo DEMON produziu resultados mais similares às referências. Ressalta-se que limiares diferentes foram aplicados, segundo as características morfológicas da MB. Dessa forma, os limiares de área de captação selecionados para a MB1, de relevo colinoso, foi de 0,2 km² (aproximadamente 111 células de 1"x1"). Para a MB2, de relevo plano, o limiar escolhido foi de 0,4 km² (aproximadamente 444 células de 1"x1"). Tal diferença está de acordo com diversas recomendações (JIMÉNEZ FERNÁNDEZ et al., 2010; JESUS, 2009; LOPEZ e CAMARASA, 1999) que apontam para o uso de diferentes limiares, estratificados em função da variabilidade do relevo, do substrato e de regimes climáticos.

A apreciação geral dos resultados produzidos no escopo deste experimento leva a considerar os processos de extração automática válido apenas como um procedimento inicial para o desenho da rede de drenagem e delimitação de microbacias. Ou seja, os algoritmos existentes ainda não são capazes de produzir informação com a qualidade necessária para substituir os métodos tradicionais.

No entanto, inspeções visuais do MDE e de suas derivações geomorfométricas locais (VALERIANO, 2008) permitem verificar que seu potencial como insumo para o delineamento da drenagem mostra-se longe de ser plenamente esgotado por estes recursos, no sentido de detalhamento e precisão das informações inferidas por análise das redes. Em recente avaliação da qualidade do MDE Topodata (MICELI et al., 2011) foi verificado que o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) enquadra-se na classe A para escala de detalhe 1:100.000 e classe B para escala 1:50.000. Este estudo foi conduzido com 40.700 pontos cinemáticos e 26 pontos estáticos, além de informações extraídas de cartas na escala 1:10.000. Estes resultados mostram que as discrepâncias relativas a drenagem referência são inaceitáveis nestas escalas (JIMÉNEZ FERNÁNDEZ, 2011).

Parte de tal limitação vem sendo atribuída aos erros locais do MDE, que propagados pela

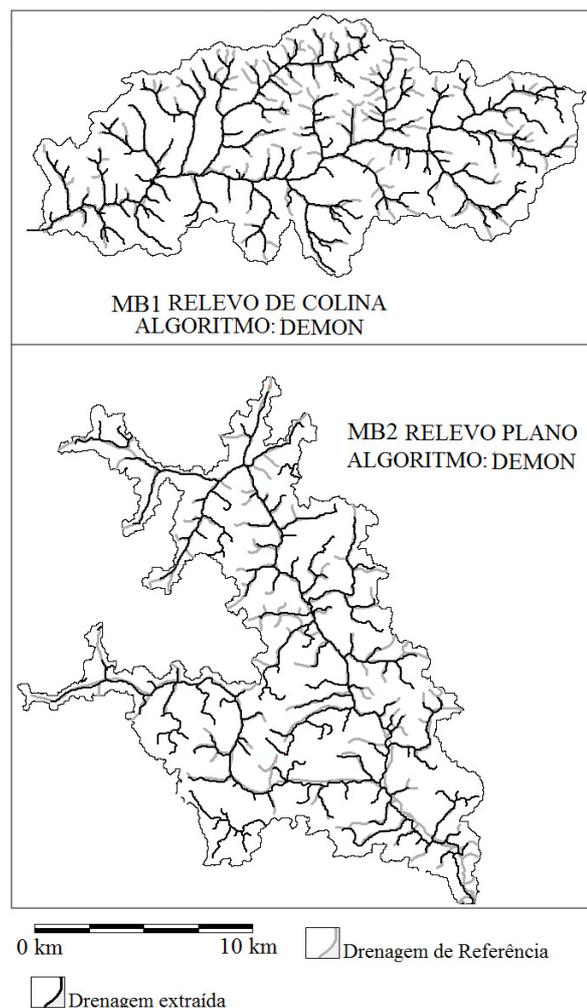


Fig. 13 – Redes de drenagem derivadas por processos automáticos, consideradas as mais próximas as redes de referências usadas.

integração de dados vizinhos nas análises (HENGL et al., 2010), levam a uma degradação da qualidade da informação produzida. Somada a estes, a perda de feições chave do funcionamento dos algoritmos pela capacidade de representação do MDE (McMASTER, 2002), reduzem o desempenho da extração automática a escalas aquém daquelas em que outras aplicações se mostram praticáveis.

Além dos fatores listados acima, formalmente reconhecidos em análises numéricas relatadas na bibliografia, devem se acrescentar a expressão da drenagem existente sobre o relevo e a representação de suas feições no MDE, ambas parciais, conforme discutido em 4.3. No caso do relevo mais plano da microbacia 2 (RO), as feições são de modo geral baixas, assim como a declividade, o que corresponde a uma dispersão das direções de fluxo vizinhas, uma condição extremamente desfavorável ao cálculo da área de captação, assim como a própria percepção das feições de drenagem, talwegues e divisores de água (VALERIANO, 2008). Embora técnicas de preparação do MDE, como a filtragem aqui adotada, ou aquelas referidas por *stream-burning* (GETIRANA et al., 2009), possam promover alguma melhoria na extração automática em áreas planas por estas modificações das propriedades geomorfológicas locais (direções, declividades etc.), a limitação intrínseca dada pela fraca expressão da drenagem no relevo permanece inalterada.

Independentemente de sua diluição em processos de generalização, as falhas na extração automática da drenagem ainda incluem outro fator de limitação, dado pela natureza do desenho da drenagem, cujas características variam com a escala de análise/representação. Assim, análises de uma mesma rede de drenagem apresentam resultados diferentes quando realizadas em diferentes escalas. Tal aspecto, aliado ao efeito do limiar adotado na complexidade da rede obtida e à raridade de dados de controle adequados, dificulta a seleção de procedimentos metodológicos com base em avaliações objetivas.

Portanto, como base experimental para subsidiar decisões metodológicas, os resultados deste e de outros trabalhos semelhantes a este, potencialmente aplicáveis para outros estudos, devem manter-se restritos às observações de cunho comparativo. Embora menos versáteis por si, os parâmetros numéricos aqui relatados podem ser

adotados em outros estudos, desde que se considerem as limitações discutidas acima.

5 CONCLUSÕES

A partir dos dados topográficos Topodata foi possível a extração automática de redes de drenagem visualmente coerentes e compatíveis com escalas de 1:100.000 e menores, embora edições posteriores baseadas na análise do próprio MDE e de outros dados que estiverem disponíveis se mantenham ainda necessárias. Por outro lado, verificou-se que a filtragem do MDE Topodata melhorou significativamente as redes extraídas em relevos planos, mas também pode favorecer a geração de segmentos não existentes. Em relação ao limiar mais adequado de valor de área de captação, determinou-se que este influi diretamente nos resultados das redes geradas, produzindo redes mais generalizadas com limiares maiores e mais complexas com limiares menores. A estratificação do processo em diferentes limiares mostrou-se um cuidado fundamental para acolher os diferentes efeitos devido às variações locais de relevo. O algoritmo de fluxo múltiplo DEMON apresentou o melhor desempenho nas microbacias analisadas, com redes de drenagem obtidas mais assemelhadas às de referência.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Thiago de Castilho Bertani pela pronta concessão dos vetores de drenagem que elaborou para estudo do interflúvio Madeira-Purus. São também agradecidos à FONACIT pela concessão da bolsa de mestrado para a Darcy Carolina Jimenez Fernandez, à FAPESP pela concessão de bolsas de doutorado para Hiran Zani e Clódís de Oliveira Andrades Filho, e ao CNPq pela bolsa de Márcio de Morisson Valeriano.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERTANI, T. C. **Sensoriamento remoto e mapeamento de paleomorfologias no interflúvio Madeira-Purus, sudoeste da Amazônia brasileira**. 104p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos: INPE, 2011.

BÖHNER, J.; CONRAD, O. **System for Automated Geographic Analyses (SAGA)**.

- 2.0.5. Hamburg, 2004. Disponível em: < <http://sourceforge.net/projects/saga-gis/files/>>. Acesso em: 20 jun. 2010.
- CANO, M. I. C. Impacto del algoritmo d en la extracción Automática de redes de drenaje a partir de modelos Digitales de elevaciones. **Cuaternario y geomorfología: Revista de la Sociedad Española de Geomorfología y Asociación Española para el Estudio del Cuaternario**, v.19 (1-2), p. 23-33. 2005.
- CHARLEUX-DEMARGNE, J.; PUECH, C. Quality assessment for drainage networks and watershed boundaries extraction from a Digital Elevation Model (DEM). In: ACM international symposium on advances in geographic information systems, 8., 2000, Washington, DC. **Proceedings...** Washington: ACM, 2000.
- CHRISTOFOLETTI, A. Análise de bacias hidrográficas. In: _____. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blucher LTOPODATAA, 1980. p. 185. ISBN 978-85-212-0130-4.
- COLOMBO, R. VOGT, J.V. SOILLE, P. PARACCHINI, M.L. DEJAGER, A. Deriving river networks and catchments at the European scale from medium resolution digital elevation data. **Catena**, v.70, p. 296–305, 2007.
- COSTA-CABRAL, M.C.; BURGESS, S.J. Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas. **Water Resources Research**, v. 30, n.6, p. 1681-1692, 1994.
- EASTMAN, R. IDRISI ANDER 15. Clark Labs, Clark University, 2006.
- ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE (ESRI). **ArcGIS Professional GIS for the desktop**. Version 9.3.1. Software. 2009.
- FERN, A. MUSAVI, M. T. MIRANDA, J. Automatic Extraction of Drainage Network from Digital Terrain Elevation Data: A Local Network Approach. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 3, p. 1007-1011, 1998.
- FERRERO, V. O. **Hidrología computacional y modelos digitales del terreno: Teoría, práctica y filosofía de una nueva forma de análisis hidrológico**. 2004. p. 391. Disponível em: http://www.gabrielortiz.com/descargas/Hidrologia_Computacional_MDT_SIG.pdf. Acesso em: 25 de abr. 2010.
- FREEMAN, T. G. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. **Computers and Geosciences**, v. 17, n. 3, p. 413-22, 1991.
- GARDNER TW, SOSOWSKY KC, DAY RC. Automated extraction of geomorphic properties from digital elevation data. **Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband**, v. 80, p. 57–68, 1991.
- GETIRANA, A. C. V.; BONNET, M-P.; ROTUNNO FILHO, O.; MANSUR, W. J. Improving hydrological information acquisition from DEM processing in floodplains. **Hydrological Processes**, v.23, p. 502-514, 2009.
- Global Mapper Software LLC. v11.01. 2002.
- GUO-AN, T; YANG-HE, H.; STROBL, J.; WANG-QING, L. The impact of resolution on the accuracy of hydrologic data derived from DEMs. **Journal of Geographical Sciences**, n.11, v. 4, p. 393-401, 2001.
- HANCOCK, G R.; MARTINEZ, C.; EVANS, K. G; MOLIERE, D. R. A comparison of SRTM and high-resolution digital elevation models and their use in catchment geomorphology and hydrology: Australian examples. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 31, n. 11, p. 1394-1412, 2006.
- HENGL, T.; HEUVELINK G. B. M.; VAN LOON, E. E. On the uncertainty of stream networks derived from elevation data: the error propagation approach. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.14, p. 1153-1165, 2010.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA, IBGE. **Banco de dados digital sobre relevo da Amazonia Legal**. 2009. Disponível em: <ftp://geofp.ibge.gov.br/>. Acesso em: 28 jan. 2010.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). 1981. **Mapa Geológico do Estado de São Paulo**, 1:500.000, Nota explicativa. São Paulo, IPT. 126p. (Série Monografia nº 6).
- JENSON S, K.; DOMINGUE, J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis,

- Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 54, n. 11, p. 1593-1600, 1988.
- JESUS, N. **Avaliação do modelo digital de elevação ASTER para análise morfométrica de bacias hidrográficas**. 175p. Tese de Doutorado (Ciências, Análise Ambiental e Dinâmica Territorial) - Instituto de Geociências (UNICAMP). Campinas, 2009.
- JIMÉNEZ FERNÁNDEZ, D. C.; VALERIANO, M. M.; PERDOMO, J. E. F.; ARASATO, L. S. Teste de limiares de área de captação para extração automática de redes de drenagem em dados SRTM. In: Anais do VIII Simpósio Nacional De Geomorfologia - SINAGEO, UFPE. Recife, PE, 2010.
- JIMÉNEZ FERNÁNDEZ, D. C. **Avaliação de algoritmos e modelos digitais de elevação para extração automática da drenagem**. 110p. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos: INPE, 2011.
- JIMÉNEZ FERNÁNDEZ, D. C.; VALERIANO, M. M.; ZANI, H. ANDRADES FILHO, C. O. Algoritmos de fluxo para extração de redes de drenagem por processos automáticos a partir de modelos digitais de elevação. In: Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, INPE. Curitiba, PR, 2011. p.5163.
- KENWARD, T.; LETTENMAIER, D.P. WOOD, E.F.; FIELDING, E. Effects of Digital Elevation Model Accuracy on Hydrologic Predictions. **Remote Sensing of Environment**, v.74, n. 3, p. 432-444, 2000.
- LAM, C. S. **Comparison of flow routing algorithms used in geographic information systems**. (2004). f. 105. Disertacao (Mestrado em Geografia) - Faculty of the Graduate School University of Southern California. Disponível em: <http://spatial.usc.edu/Users/christineslam/Lam_2004_MSThesis.pdf> Acesso em: 15 fev. 2010.
- LIN, W.; CHOU, W.; LIN, C.; HUANG, P.; TSAI, J. Automated suitable drainage network extraction from digital elevation models in Taiwan's upstream watersheds. **Hydrological Processes**, v. 20, p. 289-306, 2006.
- LOPEZ, M. J. G. CAMARASA, A. M. Use of geomorphological units to improve drainage network extraction from a DEM. Comparison between automated extraction and photointerpretation methods in the Carraixet catchment (Valencia, Spain). **JAGI**, v. 1, n. 3/4, 1999.
- MCMASTER, K. J. Effects of digital elevation model resolution on derived stream network positions. **Water Resources Research**, v.38, n. 4, p.1-8, 2002.
- METZ, M.; MITASOVA H.; HARMON R. S. Efficient extraction of drainage networks from massive, radar-based elevation models with least cost path search. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.15, p.667-678, 2011.
- MICELI, B. S., DIAS, F. M., SEABRA, F. M., SANTOS, P. R. A., FERNANDES, M. C. Avaliação vertical de modelos digitais de elevação (MDEs) em diferentes configurações topográficas para médias e pequenas escalas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 63, n.1, 191-201, 2011.
- O'CALLAGHAN, J.F.; MARK, D.M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer Vision, Graphics and Image Processing**, v.28, n.3, p.328-344, 1984.
- PELLETIER, J. Flow Routing. In: _____ **Quantitative modeling of earth surface processes**. 1 ed. United Kingdom: University Press, Cambridge, 2008. p. 295. ISBN 978-0-521-85597-6.
- PINTO, L. F. G.; CRESTANA, S. VIABILIDADE DO USO DA ADUBAÇÃO VERDE NOS AGROECOSSISTEMAS DA REGIÃO DE SÃO CARLOS, SP. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p.329-336, 1998.
- RAHMAN, M. M., ARYA, D. S., E. GOEL, N. K. Limitation of 90 m SRTM DEM in drainage network delineation using D8 method a case study in flat terrain of Bangladesh. **Applied Geomatics**. v. 2, n. 2, p.49-58, DOI: 10.1007/s12518-010-0020-2. 2010 10p.
- ROSS, J.L.S. Natureza e sociedade nos espaços agroambientais do Brasil. In: _____. **Ecogeografia do Brasil: subsidio para planejamento ambiental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 208p. ISBN 85-86238-60-0.

- ROSS, J. L. S.; MOROZ, I.C. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo** - laboratório de geomorfologia. São Paulo: Departamento Geografia- FFLCH-USP/ Laboratório de Cartografia Geotécnica - Geologia Aplicada - IPT/FAPESP – Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo- Mapas e Relatório, 1997.
- SILVA FILHO, E. P., PEREIRA, E. C.; CARNEIRO, C. **Avaliação da compactação de solos em área de pastagem no Município de Porto Velho – RO** - Amazônia Ocidental. Primeira versão. Porto Velho: EDUFRO, v.7, n. 108, 2003.
- SOUZA, A. A.; JIMÉNEZ-RUEDA, J. R. Análise fisiográfica e morfoestrutural no reconhecimento de padrões de solos no Município de Porto Velho - RO. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 6981-6985. CD-ROM, On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível em:<<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.23.59>>. Acesso em: 22 fev. 2011.
- TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and contributing areas in grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 33, n.2, p. 309-319. 1997.
- TARBOTON, D. G.; BRAS, R. F.; ITURBE, I.R. On extraction of channel networks form digital elevation data. **Hydrological Processes**. v.5, n., p. 81-100,1991.
- TARBOTON, D. G. A new method for the determination of flow directions and contributing areas in grid digital elevation models. **Water Resources Research**, v. 33, n.2, p. 309-319. 1997.
- VALERIANO, M. M. (2008) **Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. Boletim. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais. 72p. (INPE-15318-RPE/818).
- VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v.32, p.300-309, 2011.
- YANG, D.; HERATH, S.; MUSIAKE, K. Spatial resolution sensitivity of catchment geomorphologic properties and the effect on hydrological simulation. **Hydrological Processes**, v.15, n.11, p. 2085-2099, 2001.