



TESTE DE LIMIARES DE ÁREA DE CAPTAÇÃO PARA EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE REDES DE DRENAGEM EM DADOS SRTM

Darcy Carolina Jiménez Fernández – Mestranda em Sensoriamento Remoto no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Bolsista FONACIT. djimenez@dsr.inpe.br;
Márcio de Morisson Valeriano - Doutor Pesquisador do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Bolsista CNPq. valerian@dsr.inpe.br;
Jorge Enrique Flores Perdomo - Geógrafo do Ministério Del Poder Popular para el Ambiente – MPPA/Venezuela. orinoco_2916@hotmail.com;
Luciana Satiko Arasato - Mestranda em Sensoriamento Remoto no Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Bolsista CAPES. luarasato@dpi.inpe.br

RESUMO: Este trabalho tem como objetivo orientar na identificação do valor de área de captação para extração automática de redes de drenagem em áreas de topografia variável. Foram extraídas as redes de drenagem para o Município de São José dos Campos, usando os algoritmos Determinístico de oito Soluções (D8), e o Height Above the Nearest Drainage (HAND). Na extração automática foram testados vários limiares, até atingir aquele que permitisse maior semelhança das redes extraídas com a referência a escala 1:50.000. O limiar de área de captação (parâmetro funcional destes algoritmos) que permitiu um ajuste mais próximo das redes extraídas com a referência dentre os testados foi o de 25 *pixels* (20,25 ha). Foi observado um grau de deslocamento posicional notável das redes geradas com a referência, isto poderia ser pelo fato de ser geradas por processos e fontes diferentes. O algoritmo D8 gera redes com linhas mais retas em comparação com o HAND. Quanto maior o tamanho de *pixel* o valor dos erros de omissão e inclusão diminui porém aumenta a proporção de acerto nas redes geradas em relação à referência e vice-versa. Áreas não homogêneas geomorfologicamente, devem ser tratadas por sectores com características de relevo semelhantes para diminuir os erros.

PALAVRAS CHAVE: Relevo, drenagem, SIG, SRTM, HAND, D8.

ABSTRACT – This work aims at defining optimal caption area threshold as parameter for the performance of automatic drainage extraction in areas of varied topography. Drainage networks for São José dos Campos County were automatically extracted using eight-solution-deterministic (D8) and Height Above the Nearest Drainage (HAND). Different thresholds of



caption area, a key parameter for the functioning of these algorithms, were tested towards the best agreement with a reference drainage map at the 1:50,000 scale, establishing 25 pixels as the most appropriate for the entire dataset. Among the deviations, a remarkable positional displacement regarding to the reference was observed, as effect of different sources. D8 algorithm produced straight drainage lines, as compared to HAND results. A test consisted in rasterizing the drainage vectors under progressively finer resolution indicated a notably limited performance, with increasing inclusion and omission errors while coarsely increasing the overall agreement. Beside the convenience of stratified application of thresholds, the results also showed the need for manual edition to complement and correct the automatically extracted drainage networks.

KEY WORDS: Relief, drainage, GIS, SRTM, HAND, D8.

1 INTRODUÇÃO

A caracterização da rede de drenagem permite compreender diversos aspectos da paisagem, uma vez que reflete a interação de fatores como relevo, geologia, clima, vegetação textura e permeabilidade do solo, ao longo de sua formação. As análises dos dados de drenagem baseiam-se nas suas características qualitativas (forma ou tipo) e quantitativas (ordem de ramificação, distribuição, densidade e frequência). Dadas as limitações na disponibilidade de mapas de drenagem em escalas desejáveis, sua extração a partir de modelos digitais de elevação (MDE) obtidos por sensoriamento remoto representa uma alternativa importante. O surgimento de novos recursos computacionais e a disponibilidade de dados topográficos em ampla cobertura, de acesso facilitado e gratuito, tem colaborado para o desenvolvimento e progresso dos métodos de extração de informações da rede de drenagem que ajudem a compreender a dinâmica dos sistemas terrestres. Neste sentido, diversas metodologias para a extração automática da rede de drenagem a partir de MDE foram desenvolvidas em sucessão nas últimas décadas (Mark, 1983; Band, 1986; Montgomery, 1993; Tarbotton, 1997; Garçon et al., 2001; Turcotte *et al.*, 2001; Curkendall *et al.*, 2003, Rennó, 2005; Paz *et al.*, 2007). De modo geral, estas são desenvolvidas para atuar em condições específicas, das quais dependerá o sucesso da extração pretendida. A disponibilidade de dados topográficos em formato digital fornecidos pelo projeto SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) incentivou, desde então, o desenvolvimento destes recursos para aplicação em pesquisas de diversas áreas do conhecimento como ecologia,



geologia, conservação ambiental, paleologia, etc. Uma das principais vantagens que permitiu a disseminação e utilização deste dado foi devido ao fato deste cobrir cerca de 80% da massa continental da Terra com resolução espacial de 90m.

Os métodos de extração da drenagem a partir de MDE são desenvolvidos dentro de pacotes computacionais, tais como *ArcGIS*, *ENVI*, *SAGA*; *TAS*; *RiverTools* etc. Assim, existe um conjunto de algoritmos desenvolvidos por diversos autores (Fairfield e Leymarie, 1991; Quinn et al., 1991; Lea, 1992; Costa-Cabral e Burges, 1994; Tarbotton, 1997, Rennó et al., 2008) implementados nesses diferentes *softwares*, que permitem a estimativa de parâmetros hidrológicos fundamentais para a caracterização das redes de fluxo na natureza com diferentes características.

Um algoritmo comumente utilizado é o D8 (*Determinístico de 8 soluções*), desenvolvido por O'Callaghan e Mark, (1984), que considera a direção mais íngreme na jusante entre seus 8 vizinhos para determinar o fluxo de cada célula do MDE. Rennó et al. (2008) desenvolveram um descritor de terreno aplicado a dados SRTM chamado HAND (*Height Above the Nearest Drainage*), cujo funcionamento compreende, em etapa intermediária, uma extração automática da drenagem. Estes autores observaram um grande número de falsas depressões (*sinks*), provavelmente causados pelo ruído característico do radar ou pelos efeitos da vegetação (Curkendall et al., 2003) e incluíram processos para sua eliminação para a produção de MDE hidrológicamente coerentes. Sem esta correção, algoritmos baseados na dinâmica superficial da água produzem redes descontínuas. Neste contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar os algoritmos D8 e HAND (implementados no *ArcGIS* e *ENVI*, respectivamente), aplicados sobre MDE de dados SRTM, em relação ao mapeamento da drenagem em escala 1:50.000 levantada por método convencional.

2 MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo localiza-se na porção leste do Estado de São Paulo, corresponde ao município de São José dos Campos, entre as latitudes 22°46'19" a 23°24'49" S e longitudes 45°32'58" e 45°32'58" W (Fig. 1). A altimetria do município varia entre 550m a 1450m, com média de 700m. O clima da cidade, na classificação de Köppen, é do tipo CWA, mesotérmico úmido com estação seca no inverno. A área se encontra entre as serras do Mar e da Mantiqueira, onde predomina floresta de Mata Atlântica.

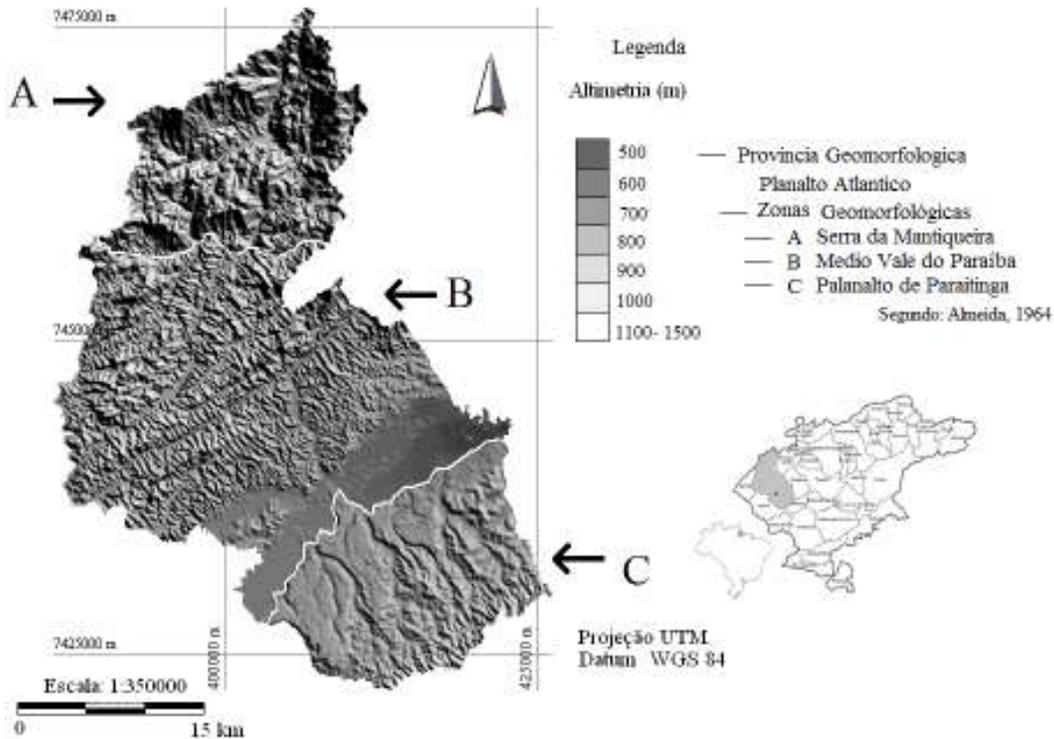


Figura 1 - Área de estudo e sua divisão em zonas geomorfológicas.

A área de estudo está inserida em um ambiente geotectônico, conhecido como Gráben do Paraíba ou Vale do Paraíba. Ocorrem rochas do embasamento cristalino, atribuídas aos grupos Paraíba e Açungüi, nas porções norte e sul, respectivamente. Sedimentos terciários do Grupo Taubaté ocorrem ao longo da calha do rio Paraíba do Sul (Nascimento, 2005). A litologia é composta de gnaisses (Arqueano ao Proterozóico Médio), suítes graníticas sin- e pós-tectônicas (Proterozóico Superior), rochas sedimentares (Terciário Superior) e depósitos quaternários (DNPM, 1983). A rede de drenagem está adaptada às estruturas geológicas da área e à variabilidade da forma do relevo, que condicionam com freqüência os padrões de drenagem. Com isso, ocorrem padrões de drenagem dendrítico e treliça, principalmente, com trechos retilíneos e incisões agudas ocasionais, devidas ao forte controle estrutural. A densidade de drenagem varia de média a alta (Ross, 1997).

A geomorfologia atual está, portanto, intimamente condicionada à tectônica (morfoestrutura), esculpida por processos erosivos e de agradação (morfoescultura) (Nascimento, 2005). Esta região está dentro da unidade morfoescultural denominada Planalto Atlântico, abrangendo três unidades de relevo regional: Serra da Mantiqueira, Médio Vale do



Paraíba e o Planalto de Paraitinga (Ross, 1997; Nascimento, 2005). Na porção da Serra de Mantiqueira, caracterizada por um conjunto de escarpas que atingem mais de 1000 m de altitude, predominam formas estruturais-denudacionais, cujo modelado constitui-se de escarpas e morros altos com topos aguçados, formadas basicamente por gnaisses, migmatitos e granitos (Florenzano, 1993; Ross, 1997). A região correspondente à unidade do Médio Paraíba do Sul apresenta formas denudacionais constituídas por morros baixos com topos convexos, colinas e formas agradacionais associadas ao Rio Paraíba do Sul. A altimetria varia de 600 m a 800 m e compõe-se principalmente de migmatitos e sedimentos arenosos a argilo-arenosos (Ross, 1997; Camargo, 2008). Na área correspondente ao Planalto de Paraitinga, predominam formas de relevo muito dissecadas, constituídas principalmente morros altos alongados com topos convexos.

O programa SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) foi desenvolvido em parceria entre as agências espaciais da Alemanha, da Itália e dos Estados Unidos, coordenado pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e pela *National Imagery and Mapping Agency* (NIMA). Estes dados têm cobertura entre as latitudes 60°N e 56°S, totalizando cerca de 80% de toda a superfície da Terra. Para América do Sul a resolução espacial deste produto é de 3 arco segundos (3" ou ~90m), com projeção em UTM, *datum* de referencia WGS84 e valores de altimetria em metros inteiros (NASA, 2010). Para este estudo, foram utilizados os dados SRTM disponibilizados pela USGS em formato .hgt (quadrículas S23W46, S24W46, S23W47 e S24W47).

O material cartográfico utilizado como dado de referência foi a rede de drenagem do município de São José dos Campos na escala 1:50.000, levantada por meios tradicionais (aerofotogrametria e reambulação). Esta informação foi extraída do banco de dados *Cidade Viva*, elaborado pela Prefeitura do Município de São José dos Campos, em formato vetorial. Com este material foi realizada a validação dos resultados obtidos pelos processos automáticos de extração da rede de drenagem.

A extração automática da rede de drenagem a partir dos dados do SRTM foi realizada utilizando-se os programas *ArcGIS* 9.2, que abriga funções hidrológicas no módulo *ArcHydro*, e o *ENVI* 4.2, que comporta a programação de lote (IDL) em que o HAND foi estruturado (Rennó et al, 2008). As etapas de processamento em ambos os programas são semelhantes, e baseiam na determinação das direções de fluxo para extração das redes de drenagem como locais por acúmulo da área de captação. Suas diferenças se dão principalmente na forma com que cada algoritmo determina a grade de direção de fluxo.



Pode-se resumir as etapas para extração das redes de drenagem por estes processos como: (a) correção do MDE para preenchimento de falsas depressões; (b) cálculo das direções de fluxo; (c) acúmulo do fluxo a montante de cada célula (obtenção da área de captação); e (d) limiarização do fluxo acumulado para definição da rede de drenagem. Nesta etapa, define-se a área de captação, em número de células (*pixels* do MDE) acumuladas, acima da qual considera-se possível o desenvolvimento de drenagem. Pelo D8, a rede gerada é ainda estruturada em microbacias e então traçadas as linhas de drenagem. Pelo HAND, a rede definida em (d) é diretamente convertida para vetor de linhas.

Após ensaios preliminares, os limiares de área de captação para testes foram estabelecidos em 12, 25 e 100 células. O uso de tais parâmetros correspondem a definir como drenagens locais que acumulam áreas de captação acima de 9,72 ha, 20,25 ha e 81 ha, aproximadamente.

Uma vez obtidos os resultados experimentais, estes foram avaliados com recursos destes softwares (*ENVI* e *ArcGIS*), bem como do *Idrisi Andes* (Clark Labs, 2009).

A avaliação foi feita mediante uma análise qualitativa e quantitativa dos resultados experimentais. As análises qualitativas foram realizadas mediante avaliação visual da sobreposição das redes em teste em relação à drenagem de referência, para observação das incompatibilidades. Da mesma forma, avaliou-se o comprimento total de cursos d'água para cada teste em comparações diversas.

Junto a isso, foram realizadas análises quantitativas sobre a aderência dos resultados em relação à referência em escalas diversas. A observação em diferentes escalas foi simulada através da rasterização dos vetores de drenagem em grades regulares de 30 m, 90 m e 270 m, seguida de comparações por tabulação cruzada e medidas de classes. A operação de tabulação cruzada permitiu uma estimativa da intersecção entre resultados experimentais e a drenagem de referência, com indicação de erros de omissão e inclusão, associados a problemas posicionais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em relação ao desempenho dos algoritmos para extrair a rede de drenagem comparada com a referência são notáveis as discrepâncias ao sobrepor os planos de informação. As drenagens de ambos os algoritmos mostraram-se parcialmente semelhantes à referência, como pode ser observado na Figura 2.

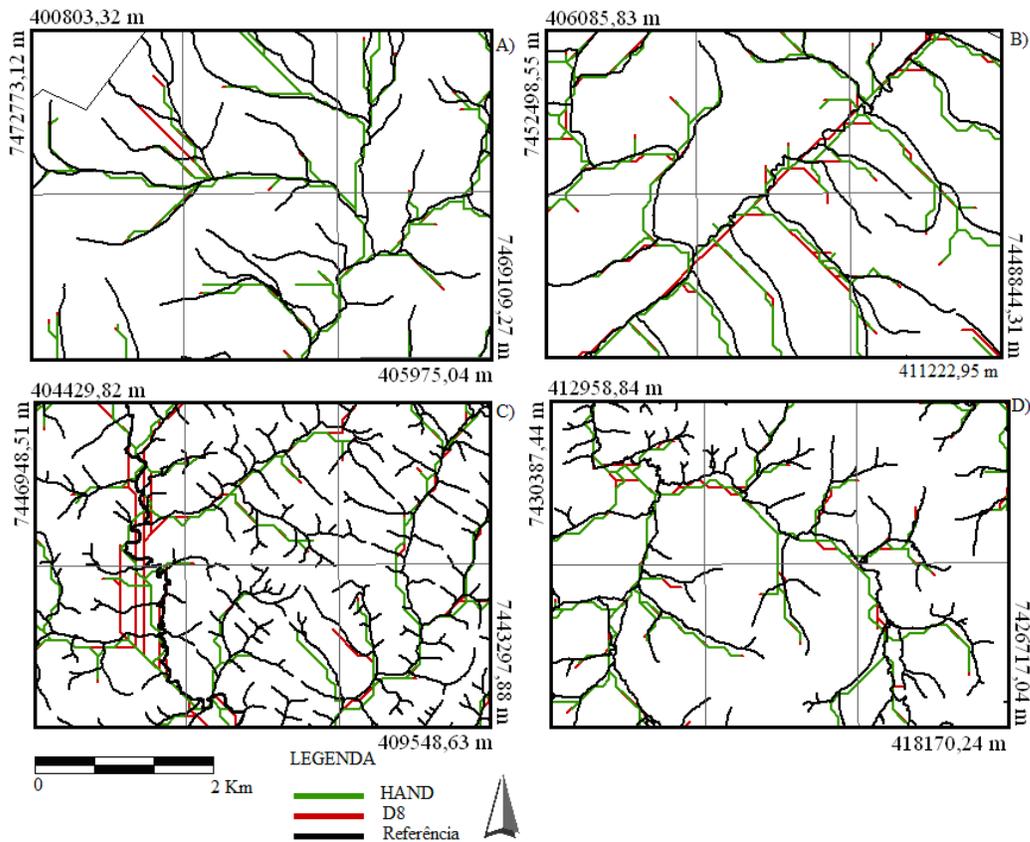


Figura 2 - Detalhe de sobreposição das redes de drenagem extraídas por processos automáticos com a referência. Limiar 25 pixels (20,25 ha). (A): Serra da Mantiqueira; (B) e (C): Médio Vale do Paraíba; e (D): Planalto de Paraitinga.

O resultado obtido pelo D8 em áreas planas apresentou um número maior de segmentos em relação ao HAND e as linhas se apresentaram mais retas e paralelas. O HAND, por sua vez criou redes de drenagem com um número maior de segmentos e permitiu linhas mais sinuosas em relação a o D8.

Essas diferenças nos produtos obtidos pelos dois algoritmos devem-se principalmente forma como cada um define a direção de fluxo. No D8, têm-se apenas 8 possíveis direções de fluxo, ou a cada 45°, enquanto a operação do HAND permite que a direção de fluxo (LDD) varie continuamente de 0° a 360°. Coerentemente, dos segmentos em que se sobrepuseram as redes experimentais e a de referência, o HAND gerou segmentos mais semelhantes às linhas de drenagem da referência, quando se observa em escala detalhada os aspectos geométricos de seu traçado. Neste aspecto, relacionado à caracterização de atributos da drenagem como



forma, sinuosidade, angularidade, por exemplo, o algoritmo D8 apresenta mais restrições em relação à escala de observação.

À medida que se aplicaram limiares mais altos, a quantidade de segmentos desenhados diminuiu e vice versa. Para os setores definidos na área de estudo, os resultados sugerem ser recomendável a extração nas áreas A e C com o mesmo limiar, enquanto que na área B este deveria ser relativamente menor, para que o desempenho em relação à referência se mostre mais homogêneo (Fig.3). Isso poderia compensar as diferenças de características topográficas que favorecem ou limitam a configuração da rede de drenagem.

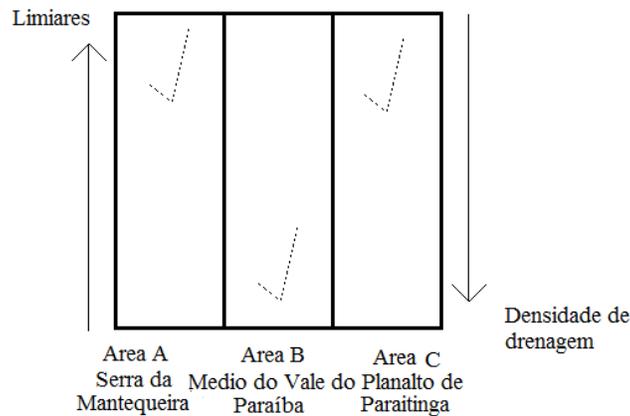


Figura 3. Relação entre o tipo de relevo, os limiares testados e a densidade da drenagem.

A análise visual dos resultados sobrepostos à referência permitiu avaliar prontamente o limiar de 25 pixels para ambos os métodos testados sobre a área de estudo como um todo, embora se possa aplicar limiares variáveis, estratificados em função do relevo local. Na Figura 3, observam-se detalhes das redes de drenagem experimentais extraídas com limiar de 25 pixels sobrepostas à rede de referência. Nos testes para determinar o limiar de melhor desempenho, devido à diversidade topográfica da área de estudo, considerou-se a aplicação de limiares particularizados por setores. Assim, foram extraídas redes de drenagem considerando limiares de 12, 25 e 100 pixels, sendo que, para as áreas A e C (Fig. 1, área de estudo) o limiar mais adequado foi de 25 pixels, e para a área B (mesma figura) de 12 pixels (Fig. 4). Deste modo cabe ressaltar que segundo as características de cada área é recomendável o tratamento isolado de modo de obter redes mais próximas a realidade, evitando porém erros de omissão e inclusão.



Na figura 4, observam-se os erros de inclusão e omissão quando áreas com diferentes características topográficas, de padrões de drenagem distintos, são tratadas como se fossem regiões homogêneas.

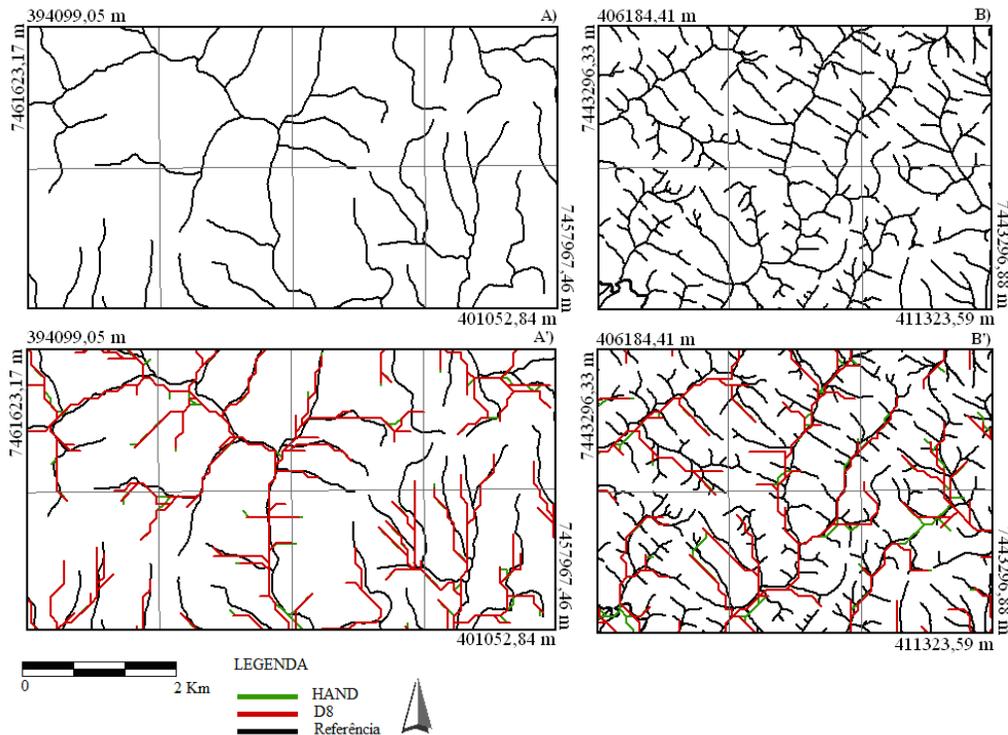


Figura 4 - Detalhe da rede de referência com as redes geradas por processos automáticos. Limiar 12 pixels. (A e A') Serra da Mantiqueira e (B e B') Médio Vale do Paraíba.

Ressalta-se que a sensibilidade dos algoritmos, manuseada através da declaração do limiar de área acumulada, pode compensar diferenças de desempenho até certo ponto. Após um aumento do comprimento estimado coerente com a drenagem de referência, cresce através da duplicação de segmentos - já determinados por limiares menos sensíveis - e não pela ampliação da rede. Tal efeito é comumente referido na literatura internacional como *feathering*, dado que a drenagem se assemelha à estrutura de uma pena, com linhas paralelas (como se apresenta D8 na Fig. 2-C). Dentro dos limites razoáveis (que aqui foi de 25 *pixels*), o comprimento total da drenagem gerada pelo algoritmo D8 (1869,17 km) foi o que se aproximou da drenagem de referência (2344,38 km). O HAND produziu uma drenagem com comprimento total de 1653,42 km. Em proporção à referência, os comprimentos das redes geradas pelos métodos HAND e D8 nestas condições correspondem a 70,52% e 79%,



respectivamente. Estas proporções podem ser diretamente associadas a estimativas da densidade de drenagem sobre estes produtos, por formas automatizadas ou manuais, uma vez que a densidade apresenta relação direta com o comprimento dos rios Christofolletti (1981). De fato, o algoritmo D8 resultou numa densidade de drenagem de 1,7 km/km² e o HAND em 1,5 km/km², a mesma proporção, dado que a área considerada no denominador mantém-se constante.

Dado que a escala de mapeamento de referência (1:50.000) suplanta o potencial dos dados SRTM-3”, há que se considerar o efeito de generalização para escalas menores, representativas das condições das análises a serem aplicadas sobre as drenagens extraídas automaticamente. Nestas condições, além dos aspectos analisados até aqui, os métodos podem ser avaliados também pela qualidade posicional da rede de drenagem. Ao se rasterizarem as linhas obtidas sobre grades regulares, pode-se simular a generalização natural dada pela visualização em diferentes escalas. Assim, diferenças no traçado perceptíveis sob grande ampliação podem ser abstraídas na fotoleitura, de acordo com a escala de representação e análise. Analogamente, diferenças posicionais da rede podem corresponder a posições idênticas de acordo com a precisão adotada na caracterização do posicionamento, por sua vez definida de acordo com a resolução da grade considerada no processo de rasterização. Dessa forma, as representações matriciais das redes nas resoluções de 30 m, 90 m e 270 m acomodam variações posicionais, bem como detalhes de sua geometria, inferiores aos respectivos espaçamentos, de modo semelhante a processos de generalização. A tabulação cruzada entre estas matrizes de drenagem expressa, portanto, a semelhança e as diferenças perceptíveis em diferentes escalas. Na interpretação das diferenças, devem ser computados erros posicionais (dados por diferenças no percurso das linhas de drenagem) somados à eficiência de cada método em termos de comprimento extraído (Tab. 1).

Tabela 1 – Tabulação cruzada entre resultados experimentais obtidos com limiar de 25 pixels (20,25 ha) e de referência rasterizados sob diferentes resoluções

Resolução	D8			HAND		
	A (%)	O (%)	I (%)	A (%)	O (%)	I (%)
30 m	12,78	87,22	81,69	11,92	88,07	80,11
90 m	31,46	68,54	51,96	29,09	70,90	47,96
270 m	55,63	44,37	26,32	58,00	41,99	24,74

A(%): Acerto/total de pixels da referência; O(%): Erros de omissão/total de pixels da referência; e I (%): Erros de inclusão/total de pixels de cada rede gerada.



Sob os aspectos apresentados na Tabela 1, os métodos mostraram indicadores semelhantes, com diferenças que podem ser negligenciadas diante do desempenho geral, relativamente padronizado. Evidentemente, os acertos (A) são maiores e os erros (O e I) menores para escalas mais generalizadas, o que é corroborado pelos índices ao longo das linhas da Tabela 1 em ambos os métodos. Porém, observa-se que os índices sugerem um grau considerável de limitação dos métodos de extração automática, dado que na generalização para 270 m (compatível com a observação na escala 1:250.000), o acerto esteve pouco acima de 55%, com erros de inclusão em torno de 25%. Nesta resolução, espera-se que as diferenças de traçado e os erros posicionais sejam assimilados, o que revela um fraco desempenho da extração automática por si, independente de quaisquer modificações em seu funcionamento. Se a diminuição dos limiares em níveis anteriores à observação de *feathering* puder aumentar os acertos, tal efeito será naturalmente acompanhado de algum aumento dos erros de inclusão. Na resolução compatível com os dados originais (90 m), o desempenho mostra-se ainda mais comprometido, dado que os erros de inclusão (~70%) mostram-se muito superiores aos acertos (~30%), o que equivale a dizer que mais da metade dos canais gerados não têm correspondência com a drenagem existente. Em 30 m, com erro de omissão próximo a 90%, desconsidera-se qualquer perspectiva de aplicação.

Basicamente, as avaliações dos resultados englobaram o teste de limiares acompanhado de análise visual, o comprimento total das redes extraídas e a tabulação cruzada. No balanço geral destas avaliações, algumas considerações de cunho prático devem ser ressaltadas em relação ao uso dos recursos testados para extração automática da drenagem.

Os limiares mostraram-se parâmetros chave para o desempenho dos algoritmos. Com limiares altos, a drenagem obtida se restringe aos canais de ordem superior, com omissão dos canais de primeira ordem, principalmente, seguido dos demais em ordem crescente de acerto. Pode-se dizer que esta situação resulta em rede mais generalizada, com perdas de detalhes e maior fidelidade aos canais principais. Com a redução dos limiares, a extração avança no sentido dos canais de menor ordem, ao custo de se aumentarem efeitos indesejáveis como o descrito *feathering* e o aumento dos erros de inclusão, sobretudo nas áreas de drenagem de maior ordem, ou canais principais. Para a definição de um limiar único, pode-se aventar a perspectiva de intervenções manuais sobre os resultados digitais, com duas alternativas antagônicas: complementar a rede por interpretação visual do MDE e posterior digitalização, caso se opte por limiares altos, ou eliminar falsos canais por edição dos resultados, caso se



opte por limiares baixos. A questão é resolvida em função dos recursos disponíveis para esta ou aquela intervenção, em que se devem considerar aspectos operacionais.

Outra frente de alternativas advém da perspectiva de se aplicarem limiares regionalizados, o que pode ser feito tanto em função da morfologia do terreno sob análise quanto da complexidade local da rede. Nessa perspectiva, pode-se recomendar limiar baixo para caracterização das bacias unitárias (primeiras ordens), em separado da aplicação de limiares altos para definição das drenagens principais. O produto final deverá, nesse caso, combinar as partes úteis resultantes das duas (ou mais) operações, num processo misto.

Para uma avaliação mais completa dos recursos de extração da drenagem, resta discernir as limitações advindas dos algoritmos daquelas advindas do MDE. Tal análise requer a extração da drenagem por diversos meios, sobretudo manuais, ao lado de processos digitais baseados em outras formas de caracterização da drenagem, o que não foi abordado no presente estudo.

4 CONCLUSÕES

- Os métodos testados apresentaram desempenho fraco, o que implica na necessidade de intervenções no seu funcionamento, que incluem sua aplicação estratificada e edição dos resultados.

- A expressão da rede de drenagem está intimamente ligada às características do relevo. Assim, a representação desta nos modelos digitais do terreno está condicionada ao grau de complexidade das feições topográficas.

- De acordo com o nível de detalhe requerido, é preciso estabelecer valores específicos de limiares que se ajustem as condições do terreno, o que pode levar a geração de erros por omissão e adição.

- Em áreas com grande variação topográfica, é necessário o tratamento destas separadamente, já que falsas informações poderiam ser geradas na procura de maior quantidade de detalhes. Portanto, não se recomenda aplicar método de extração automática de uma única forma sobre áreas heterogêneas.

- Diferenças no processo de geração das redes de drenagem podem levar a deslocamentos posicionais.



5 AGRADECIMENTOS

À Dra. Teresa Gallotti Florenzano, pela cessão dos dados de drenagem, e a Clódis de Oliveira Andrades Filho e Luiz Rógerio Mantelli pela preciosa colaboração.

6 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F. M. Fundamentos geológicos do relevo paulista. *In*: Instituto Geográfico e Geológico, São Paulo, IGG. P.169-262.1964. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto)- Instituto

BAND, L. E. Topographic partition of watersheds with digital elevation models. **Water Resources Research**, v.22, p. 15-24. 1986.

CAMARGO, F.F. Análise orientada a objeto ao mapeamento de unidades geomorfológicas a partir de dados ASTER/TERRA. 171 p. 2008. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto)- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

CHRISTOFOLETTI, A. Geomorfologia fluvial. São Paulo: Edgard Blücher, 313 p.1981.

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 (6), p. 1681–1692. 1994.

CURKENDALL, D.; FIELDING, E. J.; CHENG, T.; POHL, J. M. A. Computational-Grid based system for continental drainage network extraction using SRTM digital elevation models, 3. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PARALLEL PROCESSING WORKSHOPS, 3., 2003, p. 181, Kaohsiung, Taiwan.

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. Folhas SF 23/24 (Rio de Janeiro/Vitória): geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. Rio de Janeiro, : DNPM, 1983.

FAIRFIELD, J.; LEYMARIE. Drainage Networks from Grid Digital Elevation Models. **Water Resources Research**, v. 27(5), p. 709-717. 1991.

FLORENZANO, T.G.; CSORDAS, S.M. Mapa geomorfológico da região do Vale do Paraíba e Litoral Norte do Estado de São Paulo. Publicação INPE - Português São Jose dos Campos, SP : INPE, 1993.

GARÇON, E. A. M.; CAETANO, N. R.; MALDONADO, F.; FLORENZANO, T. G. Avaliação de método de mapeamento automático de drenagem em Cruzeiro -SP. *In*: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 10. (SBSR), 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2001. p. 447-449. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00016-1. (INPE-8247-PRE/4036).



LEA, N.L., An Aspect driven kinematic routing algorithm, in: A. J. Parsons, A. D. Abrahams, Overland flow: hydraulics and erosion mechanics: London, p. 147-175. 1992.

MARK, D. M.; Automated detection of drainage networks for digital elevation models: **Proceedings of Auto-Carto 6**, Vol. 2, Ottawa, Ontario, Canada, p. 288-298. 1983

MONTGOMERY, D. R., E. FOUFOULA-GEORGIU. Channel network source representation using digital elevation models, **Water Resources Research**, v.29(12), p. 3925-3934. 1993.

NASA. Jet Propulsion Laboratory California Institute of Technology. **SRTM**: Shuttle Radar Topography Mission. Disponível em: <http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/SRTM_paper.pdf>. Acesso em: 22 março 2009.

NASCIMENTO, R. P. S. DE. Aspectos geomorfológicos do Município de São José dos Campos (SP): ênfase na área urbana. Geoambiente online: Revista Eletrônica do Curso de Geografia do Campus Avançado de Jataí-GO, n4 2005. Disponível em: <http://www2.jatai.ufg.br/ojs/index.php/geoambiente/article/view/24/0>

O'CALLAGHAN, J.F.; MARK, D.M. The extraction of drainage networks from digital elevation data. **Computer Vision, Graphics and Image Processing**, 28, 328-344. 1984.

PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Extração automática de comprimentos de trechos de rio a partir do Modelo Numérico do Terreno para modelagem hidrológica distribuída. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR), 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 2985-2992. CD-ROM, On-line. ISBN 978-85-17-00031-7.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS – PMSJC – Secretaria de Planejamento e Meio Ambiente. **Banco de Dados Geográfico Cidade Viva**. São José dos Campos, 2003. CD-ROM.

QUINN, P., BEVEN, K., CHEVALLIER, P.; PLANCHON, O. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. **Hydrological Processes**, v. 5, p 59-79. 1991.

RENNÓ, C. D. Eliminação de áreas planas e extração automática de linhas de drenagem em modelos digitais de elevação representados por grades triangulares. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 2543-2550. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. (INPE-12690-PRE/7980). Disponível em: <<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.22.18.48>>. Acesso em: 25 fev. 2010.

RENNÓ, C. D.; NOBRE, A. D. ; CUARTAS, L. A. ; SOARES, J. V.; HODNETT, M. G. ; TOMASELLA, J. ; WATERLOO, M. J. . HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. Remote Sensing of Environment, v. 112, p. 3469-3481, 2008.



ROSS, J.L.S.; MOROZ, I.C. Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo - Laboratório de Geomorfologia. 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 - São Paulo. 1997.

TARBOTTON, 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.

TURCOTTE, R.; FORTIN, J.-P; ROUSSEAU, A.N; MASSICOTTE, S; VILLENEUVE, J.-P. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. **Journal of Hydrology**, v. 240, p. 225–242.2001.