

AVALIAÇÃO DO MODELO DE EXTRAÇÃO DE DRENAGEM D8 POR COMPARTIMENTOS GEOMORFOLÓGICOS

Phillipe Valente Cardoso *

Vagner Braga Nunes Coelho *

Rafael Silva de Barros *

Resumo: O presente trabalho tem como objetivo discutir a aplicação de uma metodologia de extração automática de feições cartográficas, a partir do exemplo da drenagem, tendo em vista a necessidade constante de criação e disseminação de metodologias de geração e atualização de bases cartográficas. O processo de extração analisado foi o *Deterministic 8 (D8)*, através de um modelo digital de elevação (SRTM 90 metros), considerando os compartimentos geomorfológicos da unidade de teste escolhida, a bacia hidrográfica do Rio São João (BHRSJ), que apresenta relevo diversificado (montanhas, morros, planícies e denso sistema de drenagem).

Palavras-chave: Bases de dados cartográficas, extração de drenagem, modelos digitais de elevação, bacia hidrográfica, compartimentos geomofologicos.

EVALUATION OF D8 DRENAIGE EXTRACTION MODEL APPLIED TO GEOMORPHOLOGICAL COMPARTMENTS

Abstract: This study considers methodologies for automatic extraction of cartographic features from the example of the drainage, which is a key aspect in environmental studies. We evaluated the method of drainage lines extracting Deterministic 8 (D8), through a digital elevation model (SRTM 90 meters), considering the variables of relief expressed by geomorphological compartments. Was chosen as the unit for testing the watershed of the São João River, which has diversified relief, with mountains, hills and plains, as well as a dense drainage system.

Keywords: Cartographic databases, drenaige extraction, digital elevation models, geomorphological compartments, hydrographic basin.

EVALUATION FOR THE MODEL OF DRENAIGE EXTRACTION D8 FOR THE GEOMORPHOLOGICAL COMPARTMENTS

* Instituto Militar de Engenharia, Seção de Engenharia E-mail: phillipevalente@gmail.com

* Instituto Militar de Engenharia, Seção de Engenharia E-mail: vcoelho@ime.eb.br

* Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Geografia E-mail: barros.rafael@gmail.com

Abstract: This study considers methodologies for automatic extraction of cartographic features from the example of the drainage, which is a key aspect in environmental studies. We evaluated the method of drainage lines extracting Deterministic 8 (D8), through a digital elevation model (SRTM 90 meters), considering the variables of relief expressed by geomorphological compartments. Was chosen as the unit for testing the watershed of the São João River, which has diversified relief, with mountains, hills and plains, as well as a dense drainage system.

Keywords: Cartographic databases, drainage extraction, digital elevation models, geomorphological compartments, hydrographic basin.

Introdução

O Brasil possui uma enorme extensão territorial e uma grande diversidade de tipos climáticos, geomorfológicos, geológicos, entre outros. Essas características dificultam o mapeamento e a atualização dos mapas básicos e temáticos em variadas escalas cartográficas, assim como a manutenção da coerência entre eles, para que não existam discontinuidades, o que geraria quebra de informação e interpretação equivocada. Nesse contexto, o país carece de investimentos e pesquisas em geração e atualização de bases cartográficas, insumos essenciais para o pleno conhecimento e a eficaz gestão do território.

Uma importante ferramenta que potencializa a geração de bases cartográficas na atualidade é o Modelo Digital de Elevação (MDE) ou Modelo Digital de Terreno (MDT), já que ambos representam a altimetria da superfície terrestre em substituição às curvas de nível. Segundo Barros (2006), a popularização desses modelos, iniciada com a disponibilização do MDE do SRTM (*Shuttle Model Topography Mission*), cobrindo praticamente todo o globo terrestre, fez com que a demanda sobre processos automatizados para a extração de variáveis (declividade, orientação, forma, isolinhas) ou indicadores cartográficos e geomorfológicos (susceptibilidade, vulnerabilidade, risco, modelos de decisão) fosse ampliada.

Uma importante variável é a rede de drenagem, elemento essencial na caracterização de sistemas hidrográficos especialmente quando não existem outros dados cartográficos. O presente artigo então tem como objetivo avaliar o modelo de extração de drenagem D8 por diferentes compartimentos geomorfológicos, visando contribuir

para a pesquisa sobre extração automática de feições cartográficas e podendo potencializar a geração e a atualização de bases cartográficas. Para cumprir esse objetivo, utiliza-se um modelo digital de elevação (SRTM 90 metros) e a drenagem de referência do IBGE como comparação, além da área teste, a bacia hidrográfica do Rio São João (BHRSJ), que apresenta relevo diversificado e um denso sistema de drenagem.

Metodologia de extração de drenagem e avaliação

Dada a relevância da temática, diversos autores estudaram metodologias para aperfeiçoar as extrações de drenagem a partir de algoritmos (O'CALLAGHAN; MARK, 1984; TARBOTON, 1997). Os algoritmos de fluxo indicam o método para identificar a formação da drenagem num MDE e existem vários softwares com esses algoritmos implementados, que podem ser de dois tipos (FIG.1), de fluxos simples, onde o fluxo escoar para uma única direção e de fluxo múltiplo em que a dispersão do fluxo, leva em conta a complexidade do relevo (PELLETIER, 2008).

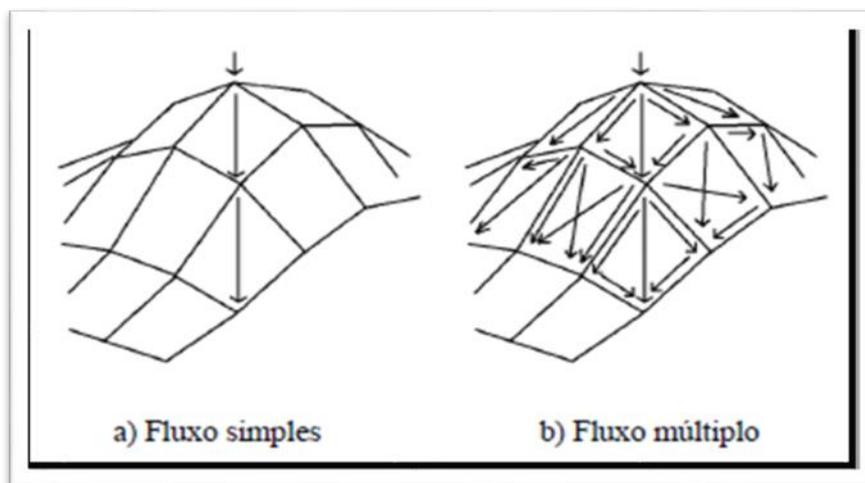


Figura 1: Representação do escoamento de fluxo simples e múltiplo. (PELLETIER, 2008).

Na delimitação de uma drenagem a partir do MDE, os algoritmos se baseiam no cálculo da área de captação, identificando quais valores atingem um limiar (FERNÁNDEZ, 2011). O limiar define a área mínima requerida para que o fluxo origine um canal: Quanto menor o limiar, mais complexa e densa será a rede de canais (TRIBE,

1990). A escolha desse limiar apresenta limitações especialmente em áreas de menor declividade e é realizada geralmente a partir de avaliação visual, ocasionalmente assistida por dados observados em mapas topográficos. Outras variáveis conhecidas na formação de uma drenagem são uniformizadas, proporcionando uma relação única entre a área de captação da bacia, o volume de água e o fluxo canalizado (FERNÁNDEZ, 2011).

Esse método de definição da direção do escoamento da drenagem utiliza para cada célula oito diferentes direções possíveis ao fluxo nas células vizinhas, ou seja, uma direção de fluxo única. Os métodos desse tipo normalmente determinam a direção pela declividade mais acentuada; assim a declividade de uma linha ligando a célula central a cada uma de suas vizinhas é calculada e identificada a célula para a qual a declividade é máxima (MARK, 1984; O'CALLAGHAN e MARK, 1984). O maior valor determina para qual célula o fluxo continua, pois a água escorre sempre pelo caminho de menor esforço. Os cálculos de declividade entre os pixels são realizados com distâncias ideais, medidas a partir do centro de cada pixel e como vantagens, não sobrecarrega os cálculos e o tempo de processamento é reduzido. A FIG. 2 mostra um exemplo do arquivo de saída de direção de fluxo.

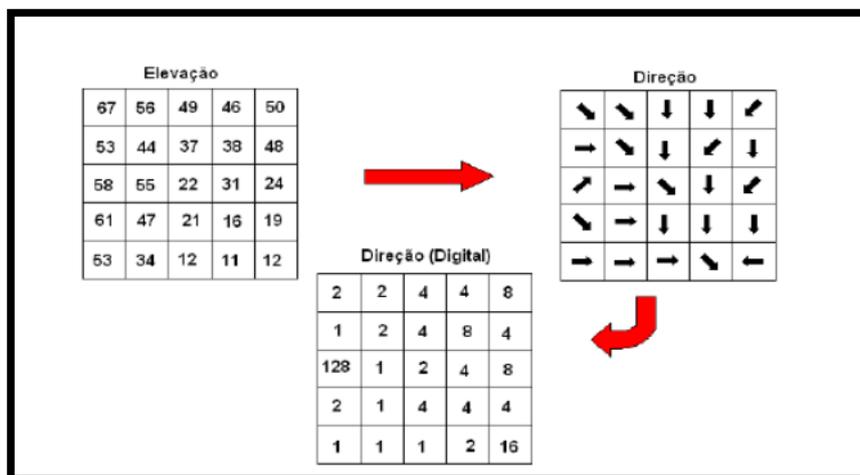


Figura 2: Esquema explicativo da função no Modelo D8. (Fonte: Manual ArcHydro 1.2)

A fórmula de declividade é dada para as direções Norte, Sul, Leste e Oeste e consiste na razão entre a altura máxima (H máximo) subtraída da altura mínima (H mínimo) pela distância:

$$\text{Declividade} = \frac{\text{H máximo} - \text{H mínimo}}{\text{Distância}}$$

Para as direções Nordeste, Sudeste, Sudoeste e Noroeste, a fórmula é dada pela razão da altura máxima (H máximo) subtraída da altura mínima (H mínimo) pela distância multiplicada por raiz de três.

$$\text{Declividade} = \frac{\text{H máximo} - \text{H mínimo}}{\text{Distância}} \sqrt{3}$$

Para o estudo foi utilizado o *software* SAGA GIS, um Sistema de Informação Geográfica (SIG) de acesso livre e código aberto para a manipulação de MDE, que suporta dados vetoriais e matriciais em vários formatos, através da biblioteca GDAL, com diferentes fontes. Apresenta diversas opções de modelos de extração de drenagem, etapa única para a realização da extração, diferentes algoritmos e um completo aporte de ferramentas hidrológicas essenciais para as análises pretendidas.

Como área teste foi escolhida a bacia hidrográfica do rio São João – BHRSJ, localizada no centro-leste do estado do Rio de Janeiro, que apresenta grande diversidade de relevo (serras, planaltos, colinas e grandes baixadas) e abastece a represa de Juturnaíba, responsável pelo abastecimento público de água de parte da Região dos Lagos. O recorte de bacia hidrográfica é importante pois é uma área que drena fluxos líquidos, sólidos e solúveis para uma saída comum através de um canal ou de uma rede de canais (COELHO NETTO, 1995), é excelente área de estudo para o planejamento (PIRES E SANTOS, 1995), e tem um papel fundamental na evolução do relevo, uma vez que os cursos d'água são modeladores da superfície.

A BHRSJ foi dividida em compartimentos geomorfológicos (FIG.3) por Seabra (2013) utilizando os critérios metodológicos empregados no desenvolvimento do Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo, como declividade dominante das vertentes e amplitude do relevo. Cada compartimento possui uma característica própria relacionada a declividade e a altitude e a diferença entre esses compartimentos pode influenciar na extração automática de drenagem, sendo comumente desconsiderados em trabalhos sobre a temática.

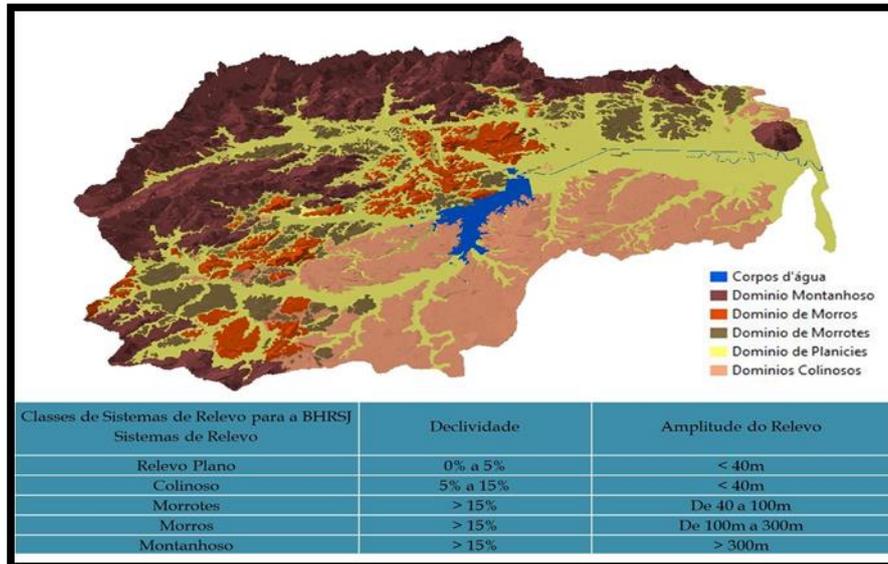


Figura 3: Perspectiva dos domínios de relevo da BHR SJ. (SEABRA, 2013).

Para analisar e avaliar comparativamente as extrações foram usados alguns métodos tradicionais na literatura sobre análises hidrológicas (FERNÁNDEZ, 2011; CHRISTOFOLETTI, 1980; PIRES E SANTOS, 1995):

- Número de segmentos de canais de drenagem - os extremos são os vértices iniciais e finais, que contém uma coordenada x e y; a quantificação desses segmentos é utilizada na avaliação e é observada a densidade de canais dentro de cada compartimento geomorfológico.
- Comprimento total dos segmentos de canais – consiste na extensão total de drenagem num compartimento geomorfológico, medida em quilômetros.
- Densidade de Canais – mostra a relação entre o número de cursos d'água (N) e a área da bacia hidrográfica (A) em quilômetros:

$$Densidade = \frac{N}{A}$$

- Análise visual - do processo de extração de drenagem, levando em conta aspectos como posicionamento, tamanho, continuidade, densidade e forma dos trechos de drenagem extraídos. Essa análise consiste numa forma de avaliação mais imediata, avaliando os resultados experimentais sobrepostos com a base de referência do IBGE e proporcionando uma definição mais apurada dos limiares.

Extração das linhas de drenagem

Foram retiradas todas as depressões do modelo SRTM, ou seja, se o valor do pixel central em um kernel 3x3 for menor considerando os pixels adjacentes, esse valor é reamostrado para ficar igual ao menor valor do pixel adjacente, assim retirando as depressões no MDE. De acordo com os procedimentos do algoritmo D8, foram geradas as áreas de captação, onde são realizados os testes de limiares. A definição de limiares é fundamental para pesquisa pois eles atribuem o grau de relevância do número digital que é atribuído ao pixel para tornar-se um canal de drenagem.

Na determinação da área de captação, o valor do pixel indica quantos fluxos estão convergindo para um pixel e existe uma grande gama de possibilidades para testar esses valores, sendo necessário elaborar uma estratégia para reduzir as extrações a serem realizadas para encontrar o limiar condizente com a área. Quanto maior o número do pixel, maior a probabilidade dele gerar um canal de drenagem (FIG. 4) e maior a possibilidade desse valor não se repetir (FIG. 5). Ou seja, quanto menor o número de pixels repetindo um valor, maior a relevância do mesmo ser um canal de drenagem.

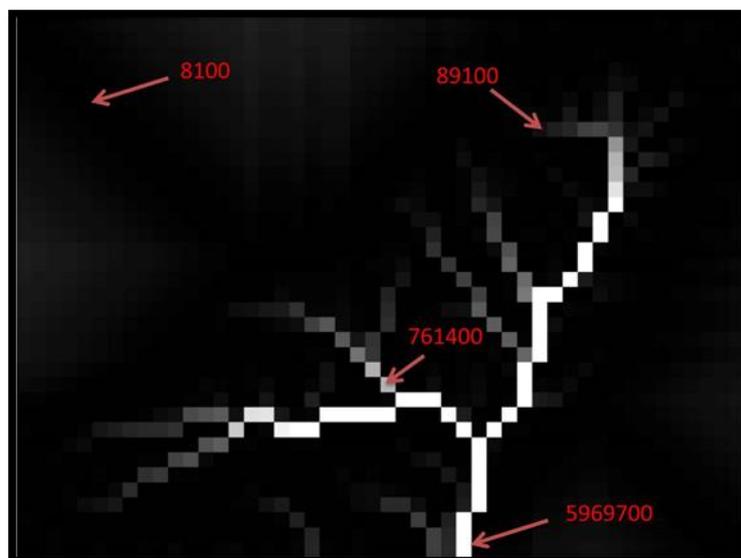


Figura 4: Representação dos valores de fluxo acumulado.

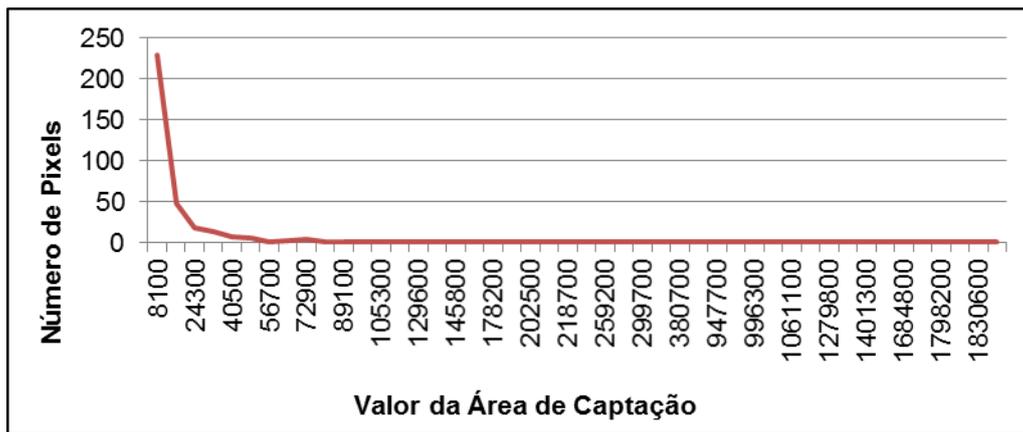


Figura 5: Gráfico da diminuição do número de pixel com o aumento do fluxo acumulado.

A metodologia de determinação dos valores de áreas de captação foi a seguinte: os valores *raster* que definem a área de captação são convertidos em pontos e cada ponto gerado equivale a um pixel com os seus valores de área de captação associados a uma tabela, através da qual é gerada uma segunda tabela para contabilizar os pixels de cada valor obtido através do *raster*, facilitando a seleção dos limiares pela tabela de atributos e diminuindo a quantidade de testes realizados. Foram então realizadas as extrações de drenagem e selecionados empiricamente valores que se aproximavam do número de segmentos e da extensão total dos canais da base de referência do IBGE, segundo os critérios avaliativos considerados.

Resultados para a bacia hidrográfica

Os resultados selecionados seguem a seguinte codificação: BHRSJ_210_453600, onde o código BHRSJ indica que a extração abrange toda a bacia, o número do meio indica a quantidade de pixels que o valor de fluxo acumulado se repete e o último número representa o fluxo acumulado. Foram executados 21 testes utilizando o modelo D8 e comparados com a base de referência do IBGE quanto à extensão total na bacia, considerando os segmentos gerados no interior da lagoa de Juturnaíba. Para os comparativos finais foram considerados os números com a lagoa incluída no MDE, mesmo sabendo da influência da mesma, gerando o efeito *feather* (pena), pois se assemelha a uma pena de ave (FERNÁNDEZ, 2011).

Observando a TAB.1 pode-se concluir que o valor 453600, referente a 56 fluxos é o que mais se aproxima da quantidade de segmentos da base do IBGE, com apenas 10 segmentos a mais e com a lagoa incluída no modelo, ou seja, sua densidade de canais fica bem próxima da referência. Com relação ao critério de extensão total dos canais, esse valor possui apenas 84,93% da extensão de referência. Já o valor 315900 (39 fluxos) apresenta a extensão mais próxima da base do IBGE com apenas 0,62% a mais, mas sua quantidade de segmentos extrapola em 36,30% a referência.

Por último o valor 396900 (49 fluxos) apresenta um resultado mais equilibrado com apenas 12,14% a mais na quantidade de segmentos e uma extensão com 90,49 % do total da extensão da base do IBGE. Considerando canais acima de 56 fluxos, os canais para a bacia hidrográfica do rio São João se aproximam do número de segmentos da base do IBGE. Por outro lado, para aproximar-se do valor da extensão, foi preciso diminuir o número de fluxos a serem considerados, que no experimento em questão foram os fluxos maiores do que 39.

Como já destacado, a BHRSJ apresenta muitas de variações de relevo e uma avaliação quantitativa funciona como norteadora na delimitação de canais de drenagem. Quanto ao critério visual, apresentado na FIG. 6, o comportamento das extrações foi semelhante aos testes anteriores, com grande densidade de canais e comportamento visualmente melhor nas áreas de relevo acidentado (montanhas). Nas áreas planas a diferença entre as bases comparadas persiste, mas a diminuição das manchas nas áreas planas e de corpos d'água foi notória, ou seja, os segmentos excedentes gerados no teste anterior nessas áreas foram alocados em outras regiões.

Tabela 1: Limiares de área de captação para a BHRSJ.

EXTRAÇÃO MODELO D8									
TESTES - D8	Pixel	Seg. c/ Lagoa	Seg. s/ Lagoa	Ext. c/ Lagoa	Ext. s/ Lagoa	Dr c/ Lagoa	Dr s/ Lagoa	% Seg.	% Ext.
BHRSJ_1_3304800	1	360	348	897.13	854.89	0.17	0.16	16.25%	32.90%
BHRSJ_4_2875500	4	411	399	959.63	915.59	0.19	0.19	18.56%	35.19%
BHRSJ_5_2826900	5	421	409	966.30	922.00	0.20	0.19	19.01%	35.44%
BHRSJ_6_2786400	6	427	415	972.32	927.89	0.20	0.20	19.28%	35.66%
BHRSJ_10_2243700	10	534	521	1086.87	1040.29	0.25	0.25	24.11%	39.86%
BHRSJ_11_2227500	11	538	526	1089.82	1043.21	0.25	0.25	24.29%	39.97%
BHRSJ_13_2178900	13	545	533	1101.74	1054.95	0.26	0.25	24.60%	40.40%
BHRSJ_15_2065500	15	563	551	1128.61	1081.55	0.27	0.26	25.42%	41.39%
BHRSJ_50_1239300	50	904	885	1445.43	1388.87	0.43	0.42	40.81%	53.01%
BHRSJ_103_729000	103	1415	1376	1851.45	1778.89	0.67	0.65	63.88%	67.90%
BHRSJ_104_712800	104	1442	1399	1868.96	1795.21	0.68	0.66	65.10%	68.54%
BHRSJ_155_542700	155	1880	1829	2122.36	2038.15	0.89	0.86	84.88%	77.83%
BHRSJ_163_526500	163	1928	1877	2153.23	2068.03	0.91	0.89	87.04%	78.97%
BHRSJ_174_477900	174	2148	2094	2259.89	2170.37	1.01	0.99	96.98%	82.88%
BHRSJ_192_461700	192	2197	2143	2296.01	2205.13	1.04	1.01	99.19%	84.20%
BHRSJ_210_453600	210	2225	2168	2315.91	2223.65	1.05	1.02	100.45%	84.93%
BHRSJ_215_445500	215	2249	2192	2335.32	2242.83	1.06	1.04	101.53%	85.64%
BHRSJ_228_396900	228	2484	2418	2467.39	2369.94	1.17	1.14	112.14%	90.49%
BHRSJ_260_348300	260	2785	2712	2620.38	2516.90	1.32	1.28	125.73%	96.10%
BHRSJ_347_324000	347	2950	2876	2710.85	2604.32	1.39	1.36	133.18%	99.42%
BHRSJ_378_315900	378	3019	2942	2743.64	2635.89	1.43	1.39	136.30%	100.62%
BASE DO IBGE	-	-	2215	-	2726.76	1.05	1.05	100.00%	100.00%

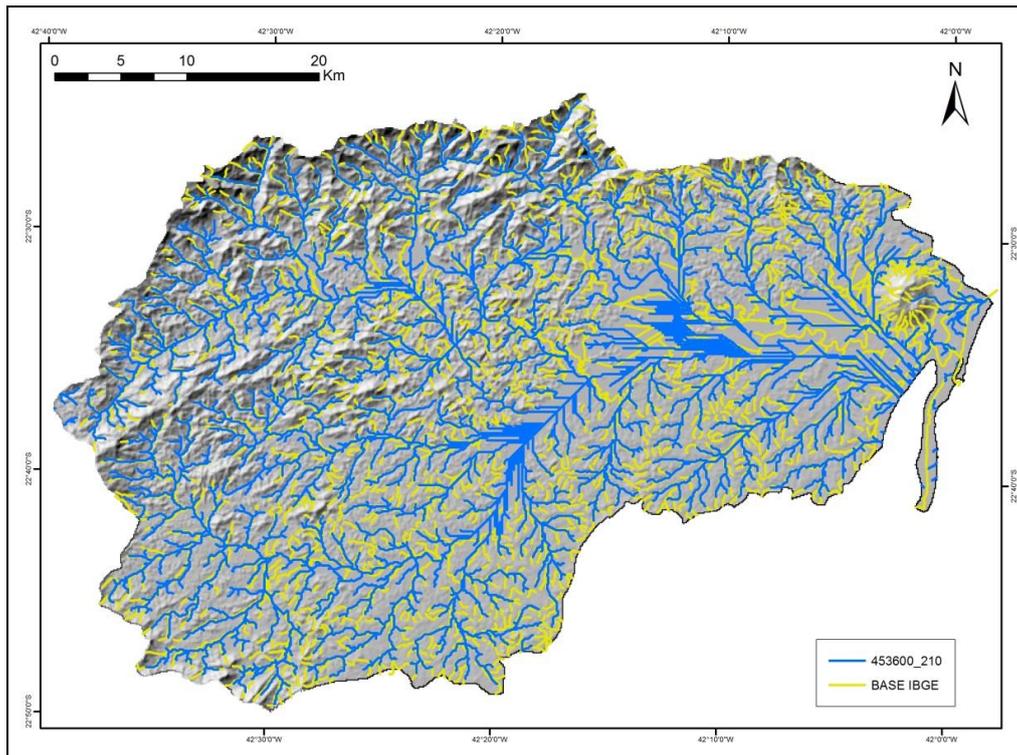


Figura 6: Representação visual da extração de drenagem com o limiar 453600.

Cabe ressaltar que quando comparadas as bases extraídas com e sem a lagoa de Juturnaíba, com relação à extensão e à quantidade de segmentos, a diferença é notável. Esse resultado pode atestar a interferência de corpos d'água de grande proporção nesse tipo de extração cartográfica. Para interferir o mínimo possível de no modelo, a seleção de limiares foi realizada considerando a lagoa.

Outro ponto importante é a não aproximação do número de segmentos e do valor de extensão total de canais para um mesmo limiar, o que pode indicar a necessidade de outras variáveis para refinar a comparação. Para isso foi analisado o segundo teste, visando um equilíbrio entre a quantidade de segmentos e a extensão dos canais.

Resultados por domínio geomorfológico

NA TAB. 2 são apresentados os resultados dos melhores limiares de área de captação encontrados através do modelo D8 para toda a bacia hidrográfica e a quantificação por domínio geomorfológico.

Tabela 2: Resultados por domínio geomorfológico

EXTRAÇÃO MODELOS D8 POR COMPARTIMENTOS GEOMORFOLÓGICOS				
Compartimentos Geomorfológicos	Testes	Segmentos	Extensão	Densidade Segmentos
MONTANHOSO	BHRSJ_D8_210_453600	493	433.85	0.76
	BHRSJ_D8_228_396900	553	468.53	0.86
	BHRSJ_D8_378_315900	676	532.96	1.05
	BASE DO IBGE	533	633.29	0.83
MORROS	BHRSJ_D8_210_453600	112	46.29	0.69
	BHRSJ_D8_228_396900	132	53.14	0.81
	BHRSJ_D8_378_315900	176	68.19	1.09
	BASE DO IBGE	217	145.46	1.34
MORROTÉS	BHRSJ_D8_210_453600	176	75.28	0.93
	BHRSJ_D8_228_396900	189	81.76	1.00
	BHRSJ_D8_378_315900	229	97.49	1.21
	BASE DO IBGE	98	88.89	0.52
COLINOSO	BHRSJ_D8_210_453600	379	282.30	0.90
	BHRSJ_D8_228_396900	475	308.48	1.12
	BHRSJ_D8_378_315900	524	356.38	1.24
	BASE DO IBGE	676	557.50	1.60
PLANÍCIE	BHRSJ_D8_210_453600	1651	1373.82	2.48
	BHRSJ_D8_228_396900	1821	1446.08	2.74
	BHRSJ_D8_378_315900	2156	1563.77	3.24
	BASE DO IBGE	1391	1187.08	2.09

No domínio montanhoso, o limiar apresenta a densidade de drenagem maior do que a base de referência, 0.86, contra 0.83. Considerando a extensão total dos segmentos, nenhum limiar conseguiu se equiparar à referência do IBGE, tendo a base que mais se aproxima a BHRSJ_D8_378_315900.

Para o domínio de morros, o valor que mais se aproxima da base de referência com relação ao número de segmentos é o BHRSJ_D8_378_315900, mas ainda sim, apresenta 41 trechos de drenagem a menos que a base de referência. Quanto à extensão total dos trechos de drenagem, os valores foram muito destoantes da referência ficando menos da metade da extensão total.

No domínio morrotes, o número de trechos de drenagem extraídos foi bastante diferente do número de trechos da base de referência; já na extensão total, o limiar que mais se aproximou foi BHRSJ_D8_228_396900.

O domínio de colinas também apresentou valores destoantes para os limiares escolhidos para a bacia inteira, tendo o resultado que mais se aproximou da base do IBGE, o limiar de 315900, tanto em número de segmentos, como em extensão total. Apesar de ainda estar distante do valor de referência, esse equilíbrio entre número de segmentos e extensão total pode indicar um equilíbrio na determinação de um limiar próprio para área, fato que não aconteceu nos demais domínios geomorfológicos estudados.

Quando analisadas as extrações no domínio de planície é possível observar que há uma grande diferença no número de segmentos e na extensão total. Essa área mais plana apresenta o maior corpo d'água da região (FIG. 7), bem como áreas alagadas, e, conseqüentemente, é onde se encontram as grandes manchas de vetores que não possuem representações com a base do IBGE.

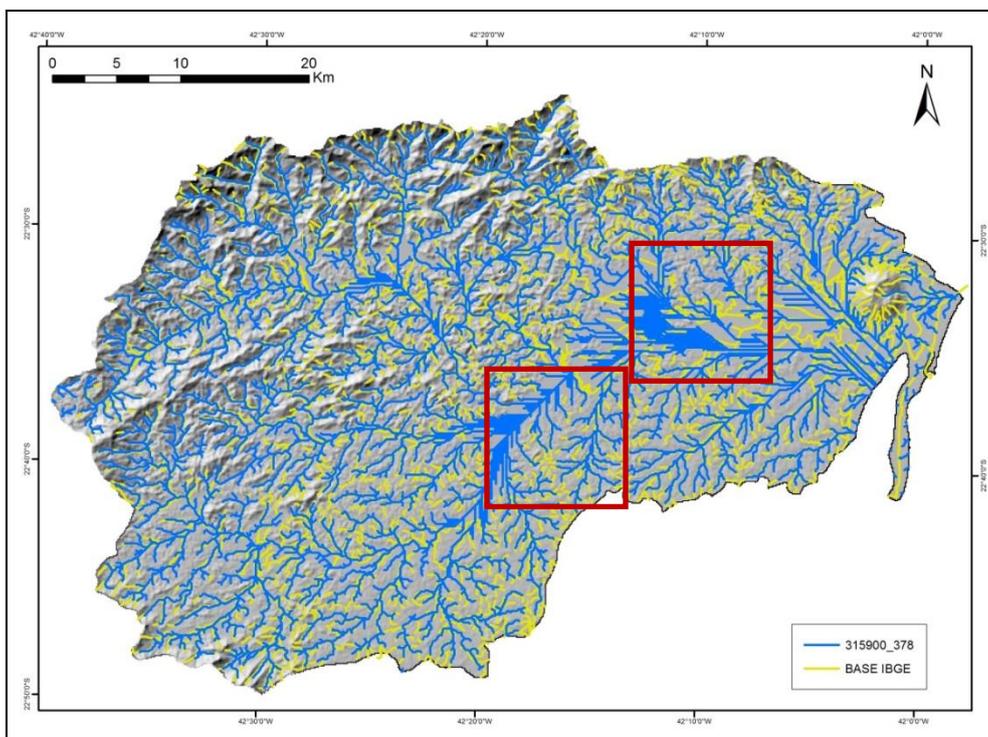


Figura 7: Representação visual da extração de drenagem com o limiar 315900 com destaque para as áreas onde há presença de corpos d'água.

Considerações finais

A partir dos resultados obtidos foi possível concluir que a variável relevo mostrou-se determinante nos processos de extração da drenagem realizados, dificultando as extrações que contemplem toda uma unidade espacial já consagrada, como por

exemplo, as bacias hidrográficas. Não foi possível definir parâmetros de extração de drenagem únicos a partir do modelo estudado para a bacia hidrográfica como um todo, como é usualmente utilizado em trabalhos desta temática. Já na análise setorizada pelos diferentes compartimentos geomorfológicos (montanhoso, morros, morrotes, colinoso e planície), foi observado que as áreas de montanhas e colinas foram as que apresentaram os melhores resultados nos processos de extração da drenagem realizados. Esses dois domínios geomorfológicos foram os únicos que tiveram feições extraídas e identificadas nas bases de referências do IBGE.

A metodologia de extração do limiar mostrou-se eficiente eliminando a necessidade de diversos testes pois através do número de fluxos é possível determinar se a rede de linhas de drenagem será mais ou menos densa, embora ainda haja a necessidade de uma avaliação visual do vetor extraído. Em algumas feições extraídas o formato retilíneo dos trechos de drenagem dificultou a avaliação em relação às bases de referência do IBGE, pois esses apresentavam sinuosidades devido ao detalhamento na vetorização. Testes de suavização de linhas talvez ajudem a solucionar esse problema, a partir de um processo de edição vetorial que não foi abordado na pesquisa. Outras alterações encontradas entre as extrações realizadas e a base de referência do IBGE podem ter ocorrido devido à diferença entre as escalas, ou em virtude do deslocamento do modelo, gerando diferenças de posicionamento das linhas de drenagem extraídas. Outros estudos tornam-se necessários no sentido de aprofundar e problematizar essas questões.

Quanto aos processos de avaliação dos resultados, os métodos utilizados tanto quantitativos quanto qualitativos foram importantes, mas ainda existiram dificuldades na avaliação como um todo. O peso maior foi dado à análise visual, cuja comparação é facilitada na investigação de redes de drenagem simples, mas torna-se mais difícil quando analisadas redes de drenagem mais complexas, quando é mais pertinente uma avaliação quantitativa. Considera-se fundamental pesquisar melhores combinações de critérios avaliativos para refinar a qualidade das extrações.

Destaca-se que os modelos digitais de elevação representam dados topográficos da realidade, mas sempre de forma abstrata, limitada muitas vezes pela resolução espacial. Torna-se relevante também realizar o mesmo estudo com outros modelos digitais de elevação, observando o comportamento das extrações de drenagem, na

tentativa de alcançar escalas cartográficas mais detalhadas. Pode ser uma alternativa a utilização do MDE SRTM 30 metros que já se encontra disponível para toda a América do Sul.

Referências Bibliográficas

- BARROS, R. S. de. *Avaliação da altimetria de modelos digitais de elevação obtidos a partir de sensores orbitais*. 2006. (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Pós-Graduação em Geografia, 2006.
- CHRISTOFOLETTI, A. *Geomorfologia*. 2. ed. São Paulo: Edgar Blücher LTopodataA, 1980. 185 p. ISBN: 978-85-212-0130-4.
- COELHO NETTO, A. L. *Hidrologia de encosta na interface com a geomorfologia*. In: GUERRA, A. J. T e CUNHA, S. B. da. *Geomorfologia: Uma atualização de bases e conceitos*. 7. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. p. 93 – 148. il.
- FERNÁNDEZ, D. C. J. *Avaliação de algoritmos e modelos digitais de elevação para extração automática da drenagem*. 2011. 92 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2011.
- MARK, D. M. *Automated detection of drainage networks from digital elevation models*. Cartographica, v. 21, n. 2-3, p. 168-178, 1984.
- MANUAL ARCHYDRO 1.2, http://galileu.iph.ufrgs.br/collischonn/MGB-IPH/MGB_minibacia_arquivos/Manual_ArcHydro_1.2.pdf, Acessado em 04 de outubro de 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, 295 p. ISBN: 978-0-521-85597-6.
- PIRES, J.S.R.; SANTOS, J.E. *Bacias Hidrográficas - integração entre meio ambiente e desenvolvimento*. Ciência Hoje, Rio de Janeiro, v. 19, n. 110, p. 40- 45, 1995.
- SAGA GIS. Disponível em: <<http://www.saga-gis.org/en/index.html>> (Acesso em 20 de julho de 2011).

SEABRA, V. da S. *Uso de modelos digitais de elevação para mapeamento de variáveis morfológicas do relevo na bacia hidrográfica do rio São João*. Revista Tamoios, São Gonçalo, v. 8, n. 2, Fevereiro de 2013.

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, February 1997.

TRIBE, A. *Towards the automated recognition of landforms (valley heads) from digital elevation models*. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPATIAL DATA HANDLING, 4, 1990, Zurich, Switzerland. Proceedings. Zurich, Switzerland, 1990, p.45-52.