

Efeitos da generalização cartográfica em extração de rede de drenagem gerada de forma automática

Luciana Escalante Pereira

da Universidade Federal De Mato Grosso do Sul
l.escalante.pereira@gmail.com

César Claudio Cáceres Encina

da Universidade Federal De Mato Grosso do Sul

Antonio Conceição Paranhos Filho

da Universidade Federal De Mato Grosso do Sul

Resumo: Através de Modelos Digitais de Elevação (MDE), é possível realizar a extração automática de rede de drenagem, que além de ser um procedimento rápido, é base para a geração de outros dados em estudos hidrológicos. Entretanto, com o avanço das geotecnologias e aumento de produtos disponíveis digitalmente, muitos dados são gerados de maneira automática desprezando-se características de amostragem dos dados. Neste trabalho, as características de amostragem consideradas para a rede de drenagem foram duas: escala de visualização e influência do MDE. Para isto, foram utilizados três MDEs: ASTER-GDEM, TOPODATA e SRTM-4; e cinco escalas de representação: 1/50.000, 1/100.000, 1/150.000, 1/200.000 e 1/450.000. A rede de drenagem foi analisada em duas perspectivas: por amostras e por análise da população. De acordo com a análise com base na escala, os resultados mais satisfatórios foram na escala de 1/450.000, sendo esta a escala onde os MDEs apresentaram maior taxa de precisão (delineamento compatível a canais hídricos). Nas escalas maiores (1/50.000 e 1/100.000) os desacertos entre extração automática e canal hídrico são mais perceptíveis ao olho humano, o que influenciou na avaliação de áreas com resultado satisfatório para delineamento de cursos d'água. Na análise populacional o fator escala foi desconsiderado e o SRTM-4 foi o MDE que obteve maior precisão: 73% de regularidade com os cursos d'água.

Palavras-chave: Escala; Efeito Dossel; Rio Formoso; Sensoriamento Remoto.

Introdução

As redes de drenagem são a base para a definição das bacias hidrográficas, componente essencial dos modelos hidrológicos e dos planos de gestão de recursos hídricos (O'CALLAGHAN e MARK, 1984). As informações de rede de drenagem podem ser aplicadas na tomada de decisão, com a definição de locais onde há risco de inundação, no planejamento agrícola visando evitar erosão e desertificação (REINOSO-GORDO et al., 2017), entre outras aplicações hidrológicas já difundidas. O uso de Modelos Digitais de Elevação (MDE) é uma das formas de se conseguir dados de drenagem de uma região de uma maneira rápida.

A introdução do modelo digital de elevação se deu nos anos 1950 como uma alternativa ao método manual, mas começou a ser amplamente utilizado nos anos 1980 (WANG e YIN, 1998). O método automático de extração de drenagem apresenta vantagens quando comparado ao método manual como: rapidez na obtenção dos parâmetros hidrológicos, reprodutibilidade dos resultados e diminuição da subjetividade (TRIBE, 1992; AKRAM et al., 2012). Entretanto, verifica-se que algumas vezes pouca atenção foi/é dada à precisão da representação da rede de drenagem (MONTGOMERY e FOUFOULA-GEORGIU, 1993).

Tarbonton et al. (1991) menciona em seu trabalho o cuidado que se deve ter em uma extração automática de drenagem para assegurar que as redes sejam extraídas em uma escala adequada, visto que muitas vezes, o procedimento de extração a partir de MDEs é feita de forma arbitrária. Os MDEs, assim como outros dados de satélites, podem ter sua acurácia afetada por vários fatores tais como erros durante a coleta de dados, erros sistemáticos e erros desconhecidos que dependem geograficamente das condições do terreno, que não podem ser evitados (PATEL et al., 2016).

No contexto das geotecnologias, muitos trabalhos mencionam a importância de se ponderar a escala de amostragem dos dados. A relação entre escala e MDE não é uma discussão nova, já sendo apresentada em alguns trabalhos como o de Wang e Yin (1998) onde os autores utilizam a rede de drenagem para avaliar alguns parâmetros derivados desta, em função de duas escalas: 1/24.000 e 1/250.000. Entretanto, nota-se que o efeito escala para a geração e representação de uma rede de drenagem extraída automaticamente, muitas vezes, ainda tem sido desprezado no resultado e produto final do trabalho.

Considerando isto, nós usamos dados de extração automática de drenagem para avaliar o quanto a escala de amostragem pode ou não interferir na análise final de um trabalho. Para a análise foi considerado cinco escalas de testes e a rede de drenagem gerada por três diferentes MDEs. Com o número de variáveis envolvidas, pode-se ampliar a gama de discussão.

Para isto, o artigo foi dividido em duas partes: o primeiro foco foi dado para a precisão da rede de drenagem extraída automaticamente em relação à escala de representação, usando-se para isto cinco diferentes valores de escala; o segundo foco foi uma comparação entre as redes de drenagens geradas pelos MDEs SRTM, ASTER-GDEM e TOPODATA, com base na rede hidrográfica da bacia.

Área de estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Formoso (BHRF) ocupa uma área de aproximadamente 1.355 km² no Estado de Mato Grosso do Sul, Brasil, e tem como principal curso d'água o Rio Formoso. A região é conhecida pelas belezas naturais, o que a torna uma das principais rotas turísticas do Estado. A bacia hidrográfica do Rio Formoso está inserida quase que totalmente dentro do Município de Bonito (Figura 1), que tem o ecoturismo como uma das principais fontes de renda da região.

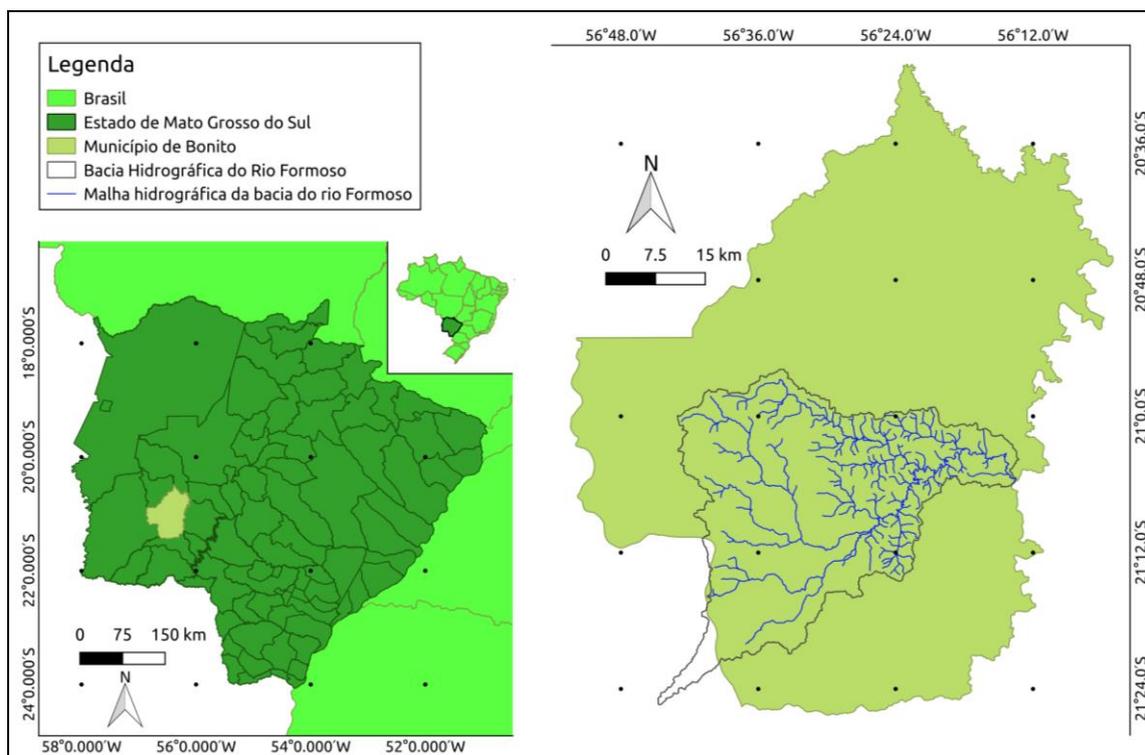


Figura 1 – Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Formoso. A malha hidrográfica da bacia encontra-se inserida dentro do município de Bonito-MS.

A BHRF tem na região mais baixa a porção mais abundante de cursos d'água e a drenagem apresenta um padrão de drenagem dendrítica. Na parte oeste da BHRF está localizado a Serra da Bodoquena, uma região que possui as maiores cotas de altitude da bacia, com cotas que ultrapassam os 500m, as áreas mais baixas da bacia possuem cotas de altitude em torno dos 200m. Dessa forma, é uma área que oportuniza distinguir com certa clareza as diferenças de altitude nos MDEs utilizados.

Material e métodos

Antes de discorrer sobre cada uma das etapas da metodologia, a figura 2 apresenta um fluxograma simplificado com parte da metodologia adotada.

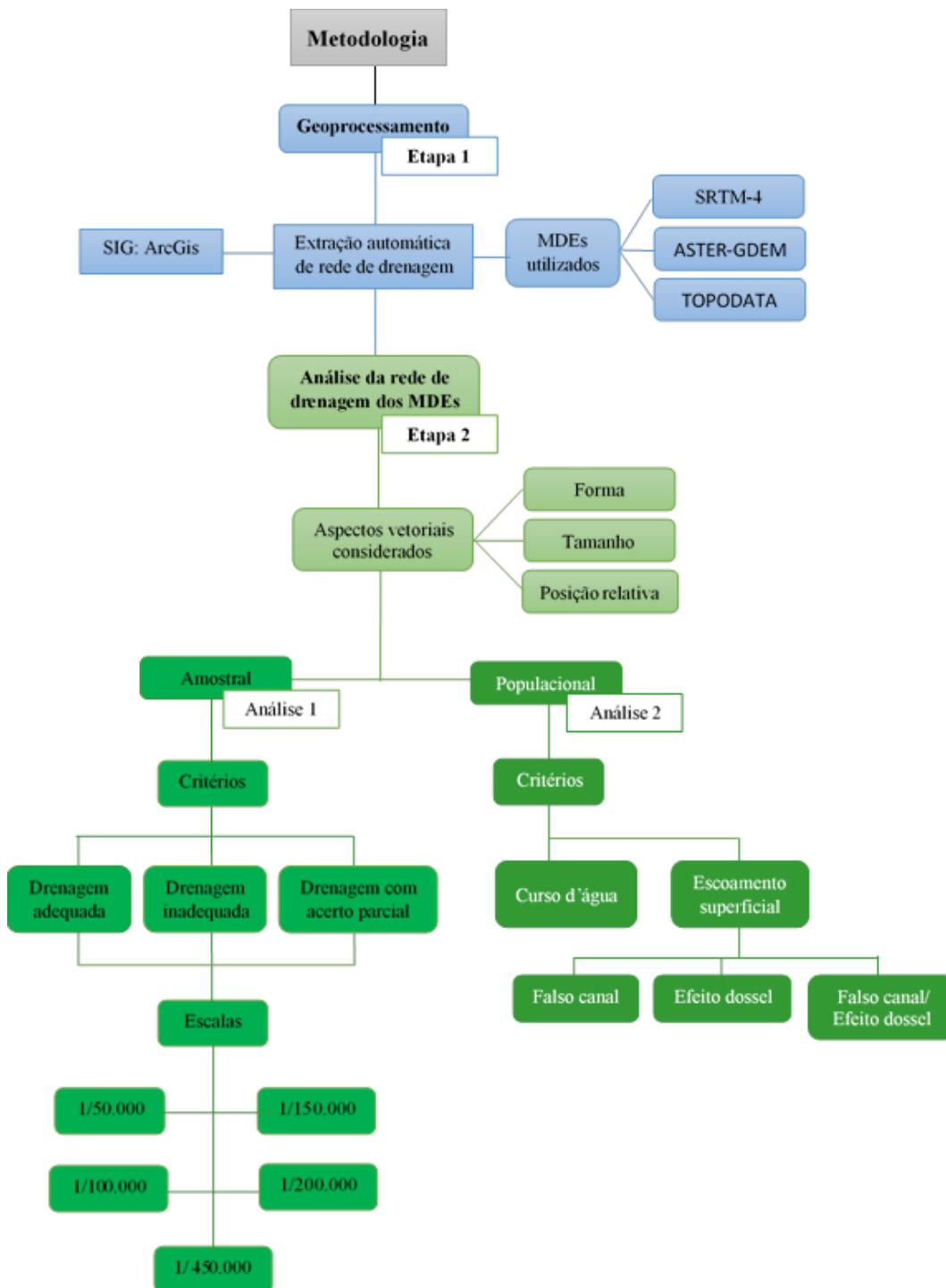


Figura 02 - Fluxograma exemplificando os métodos e etapas de análise

Modelo Digital de Elevação

Foram utilizados 3 MDEs para extração de rede de drenagem: SRTM-4, ASTER-GDEM e TOPODATA. O MDE pode ser definido como uma grade raster de valores de elevação regularmente espaçados (USGS, 2003), que estão em um padrão X, Y e Z. O valor Z corresponde à altitude, X e Y são os valores de coordenadas geográficas.

O *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) utilizado no trabalho possui uma resolução espacial de 90 m (3 arcos de segundo), onde a acurácia vertical absoluta do MDE é reportado em torno de 16 m (NASA, 2009). No trabalho usou-se a 4ª versão do SRTM, sendo chamado de SRTM-4. O TOPODATA é um MDE disponibilizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) para o território brasileiro, sendo adquirido a partir do refinamento de dados SRTM de 3" para 1" (~30m) (VALERIANO e ROSSETI, 2012). O *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer – Global Digital Elevation Model* (ASTER-GDEM) apresenta resolução espacial de 30 metros e acurácia vertical absoluta de 7 metros (ABRAMS et al., 2002).

Devido às especificações de cada MDE, tais como resolução, precisão/exatidão, entre outros, os resultados podem sofrer mais variações do que as características do próprio relevo (VALERIANO e ROSSETTI 2010). Além disso, com MDEs de diferentes resoluções espaciais é possível observar como a resolução horizontal de um MDE pode vir ou não a sofrer com a interferência de fatores externos (vegetação, relevo, etc) ao MDE. Além disso, ajuda a descrever como é a variação dos dados de acordo o produto utilizado. Como descrito por Kenward et al. (2000), já existem estudos que mostram que os modelos hidrológicos distribuídos espacialmente são sensíveis a resolução horizontal do MDE.

Extração da Rede de Drenagem

A extração automática de rede de drenagem foi realizada com uso dos MDEs ASTER-GDEM, TOPODATA e SRTM-4, utilizando o software ArcGis (ESRI. Arcmap, 2012). As redes de drenagens foram extraídas com limiar de valor de escoamento acumulado de 1000. Este representa o número mínimo de células necessário para iniciar um canal. O valor de limiar utilizado representa uma etapa fundamental no resultado, sendo este o que acaba interferindo na densidade da rede

gerada. A escolha deste limiar foi através de tentativa e erro, tendo o intuito de gerar uma rede de drenagem numérica com aproximadamente o mesmo nível de detalhe da malha hidrográfica.

O algoritmo de direção de fluxo utilizado foi o D8, que trabalha com uma variação de ângulo a cada 45° . Isso resulta em 8 direções possíveis para o escoamento superficial dentro de cada píxel. O fluxo de escoamento é direcionado conforme as declividades mais baixas apresentadas pelos píxeis vizinhos. Uma imagem georreferenciada LISS3 do satélite IRS-P6 datada de setembro de 2010 (INPE, 2010), com composição falsa-cor RGB-342, foi utilizada como plano de fundo para a comparação da extração de rede de drenagem automática com a malha hidrográfica. A imagem multiespectral facilitou o processo de interpretação dos dados.

Os dados da malha hidrográfica da bacia do rio Formoso foram disponibilizados pelo Laboratório de Geoprocessamento para Aplicação Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS). A malha hidrográfica utilizada atende a um padrão Classe A no Padrão de Exatidão Cartográfica, podendo ser enquadrada na escala 1:50.000, considerando a resolução espacial da imagem e que o erro do georreferenciamento foi no máximo de 1 píxel (15m) (TERUYA et al., 2016).

Dessa forma, foi possível usar a malha hidrográfica gerada através de interpretação visual como base para a análise da rede de drenagem gerada automaticamente.

Análise dos dados

A rede de drenagem foi analisada sobre dois aspectos: escala de visualização e MDE. No primeiro aspecto, a análise foi realizada utilizando-se de áreas amostrais, no segundo caso, foi analisado a rede de drenagem em sua totalidade. A robustez da análise integral de uma rede de drenagem de uma bacia hidrográfica com 1.355km^2 , foi determinante para que se optasse em dividir a avaliação dos dados em duas formas de análise. Desse modo, a análise amostral foi essencial para que se conseguisse ponderar a influência do fator escala sobre os dados de rede drenagem extraídos de forma automática. Em ambas as análises, a precisão ou imprecisão foi determinada com base na geometria do segmento do MDE comparado a drenagem da malha hidrográfica. Para isto, foram considerados os seguintes aspectos na avaliação da geometria do vetor: forma, tamanho e posição relativa.

Primeira análise: escala de visualização

A análise com base na escala de visualização foi realizada utilizando-se de áreas amostrais. Para isto, foi criada uma malha regular de quadrantes sobre a bacia hidrográfica, cada um com 1000m², totalizando 1287 quadrantes. Destes, foram selecionados aleatoriamente pelo Sistema de Informação Geográfica (SIG) 93 quadrantes para a análise, sendo estes divididos em 3 grupos amostrais, cada um contendo 31 elementos (Figura 3). No total foram 93 quadrantes de 1000 m² cada, selecionados aleatoriamente pelo SIG, divididos em 3 grupos de amostras. Os quadrantes foram às áreas utilizadas na análise de rede de drenagem extraída automaticamente dos MDEs.

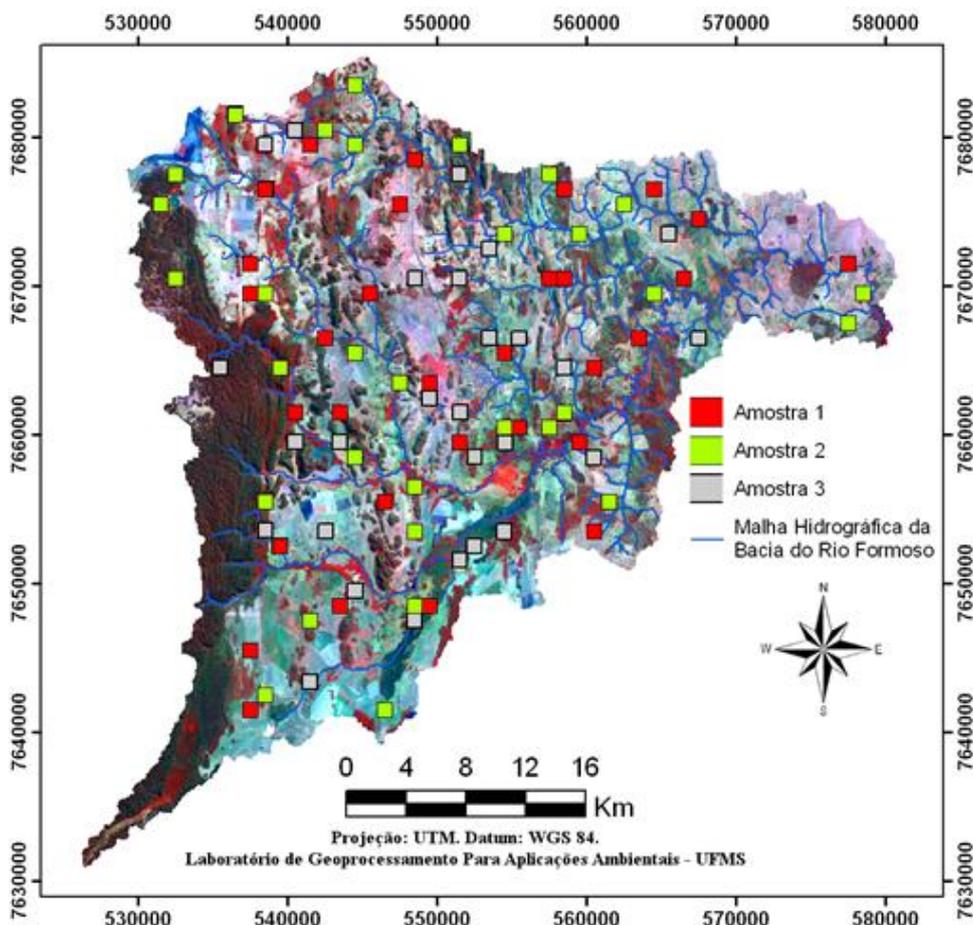


Figura 03 - Áreas utilizadas na análise de rede de drenagem.

(1) A divisão da análise em 3 grupos foi ponderada com o propósito de simplificar as análises e, ao mesmo tempo, ter um número de elementos com representatividade espacial dentro da bacia hidrográfica. Dessa forma, a definição do número de elementos constituinte das amostras foi selecionado seguindo o princípio do Teorema Central do Limite, anunciando por Laplace em 1810 (Cordeiro, 2006). Esse teorema considera que sempre que o número de elementos da amostra for maior ou igual a 31 ($n \geq 31$), a amostra segue uma distribuição normal. Como menciona Shimakura (2009), Teorema Central do Limite é notável porque permite conduzir alguns procedimentos de inferência sem qualquer conhecimento da distribuição da população.

Além disso, trabalhando com grupos amostrais foi possível ter as áreas analisadas ao mesmo tempo por mais de um analista. Na análise amostral só foram considerados as linhas de drenagem inseridas dentro dos quadrantes selecionados e para isto foram adotados os seguintes critérios de avaliação:

- 1- **Drenagem adequada:** quadrantes em que a rede de drenagem extraída de forma automática coincidiu com o curso d'água;
- 2- **Drenagem inadequada:** quadrantes onde a geração de rede de drenagem por parte da extração automática está relacionada às características topográficas (falso canal) e de cobertura vegetal (efeito dossel) local, podendo ter a ocorrência ou não de curso d'água no quadrante;
- 3- **Drenagem com acerto parcial:** quadrantes em que há curso d'água, mas a rede extraída do MDE é divergente.

Considerando os aspectos de Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), erro gráfico e resolução espacial, foram definidas cinco escalas para estudo: 1/450.000; 1/200.000; 1/150.000; 1/100.000; 1/50.000. A escala de 1:50.000 foi estabelecida com base na resolução espacial da banda pancromática (15m) da imagem do satélite Landsat-7, visto que, a mesma foi usada para a obtenção da malha hidrográfica através de fotointerpretação.

Para a definição das outras escalas, também foi considerado o aspecto de resolução espacial, neste caso, a resolução espacial dos MDEs. Com uma resolução espacial de 30m, a maior escala de trabalho sugerida é de 1:80.000, sendo adotado na pesquisa a escala de 1:100.000. Possuindo uma resolução espacial de 90m (tamanho do pixel) e considerando o erro gráfico, a escala mais adequada para trabalho no SRTM-4 seria a de 1:450.000, em função disto, essa escala foi selecionada para análise. Já as

escalas de 1:150.000 e 1:200.000 foram usadas por serem intermediárias as escalas de 1:100.000 e 1:450.000.

Segunda análise: rede de drenagem dos MDEs

Esta análise foi realizada visando a avaliação completa da rede de drenagem extraída automaticamente por cada MDE. Para isso, todos os segmentos vetoriais da extração automática de rede de drenagem foram comparados à malha hidrográfica.

Para a avaliação, as linhas da rede de drenagem geradas automaticamente foram sobrepostas à malha hidrográfica, sendo avaliado um MDE por vez. Assim, foi possível caracterizar cada segmento, descrevendo o que a linha processada estava representando no terreno. Nos casos em que o segmento do MDE analisado não correspondia à curso d'água, este era analisado como passível de 3 possibilidades:

1-Falso Canal: linhas de escoamento relacionadas à topografia e malhas viárias (feições artificiais), sem a ocorrência de cursos de água no entorno;

2-Efeito Dossel: linhas de escoamento relacionadas à vegetação. Locais onde há cobertura vegetal sem a ocorrência de cursos d'água;

3-Falso Canal/ Efeito Dossel: áreas onde há cursos de água, mas o MDE, por interferência de alguma condição como vegetação, topografia e/ou malhas viárias, gerou linhas divergentes com a malha hidrográfica. Como divergência foram considerados linhas de escoamento paralelas à vegetação, criando muitas vezes mais de uma linha no entorno da região arbórea e linhas de escoamento duplicadas, áreas onde se criou mais de uma linha para representar o mesmo curso d'água;

Dessa forma, foi possível obter o percentual de compatibilidade entre as extrações automáticas de rede de drenagem com a malha hidrográfica, quantificando quanto da extração automática de cada MDE corresponde a cursos d'água e/ou outros aspectos. O fator escala foi desconsiderado nesta análise.

Resultados e discussões

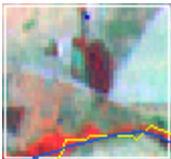
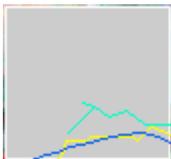
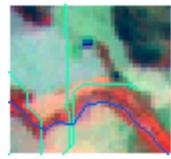
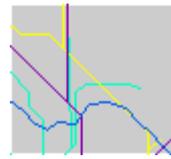
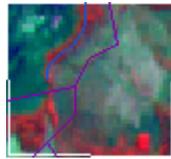
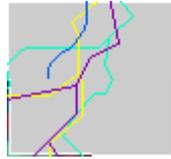
Escala de visualização – Análise 1

A representação de acordo com a escala demonstra a influência na avaliação subjetiva dos dados. Na interpretação visual, a generalização cartográfica sobre o resultado gerado é muito influenciada pelo conhecimento do operador. Na drenagem

extraída automaticamente dos MDEs, não há subjetividade, sendo o resultado interferido por outros aspectos (SIG, algoritmo utilizado, terreno, vegetação, MDE, etc).

Para entender os critérios usados para qualificar as feições dos MDE, alguns modelos são apresentados na Tabela 1. Os exemplos de como foram qualificadas as linhas geradas na extração automática de drenagem. Visualização das imagens mantendo a proporção das respectivas escalas para mostrar o efeito destas sobre a percepção visual do avaliador. Quadrante com 1000m². As áreas selecionadas são exemplos do que foi considerado precisão, imprecisão ou acerto parcial, visualizados em 4 escalas. Dentre as escalas utilizadas, a 1:450.000 não foi representada devido à inviabilidade de visualizar as áreas amostrais.

Tabela 1 – Exemplos de áreas selecionadas para análise

	Escala				Traçado de todos os MDEs e o curso fluvial
	1:50.000	1:100.000	1:150.000	1:200.000	
Adequado					
Inadequado					
Acerto parcial					

 SRTM-4
  ASTER-GDEM
  TOPODATA
  Curso fluvial

Na área colocada como exemplo de extração automática com resultado adequado, o curso d'água em questão possui aproximadamente um comprimento de 1.360m, sendo que o SRTM-4 não gerou linhas de escoamento, não sendo representado. Como gerou menos feições de drenagem, em alguns quadrantes amostrais não havia feições do SRTM-4 a serem analisadas.

No exemplo de extração de drenagem inadequada, o trecho em destaque é uma região onde o sentido de direção de fluxo da água é Nordeste-Sudoeste. ASTER-GDEM gera canais espúrios com sentido de escoamento Norte-Sul; e os MDEs SRTM-4 e TOPODATA apresentam um sentido Nordeste-Sul.

A área de acerto parcial é uma área de nascente, onde os MDEs apresentaram mais desconformidade com o curso d’água, criando linhas que representam canais espúrios de fluxos. As nascentes foram áreas que ocasionaram em muito desacertos na extração automática. Segundo Yang et al. (2010a), as áreas planas em um MDE não apresentam exatamente o mesmo nível na natureza, porque os mesmos não podem representar diferenças na elevação que são menores que sua resolução vertical. Desse modo, redes de drenagem em áreas planas são mais difíceis para os MDEs identificarem, nascentes nessas condições ocasionam mais erros na extração automática. Além das nascentes, as jusantes também se configuram como áreas onde a extração automática apresentou bastante divergência com a malha hidrográfica. A característica natural dos cursos d’água, como sinuosidade foi um dos empecilhos na extração automática de drenagem face à resolução dos MDEs.

Das 5 escalas analisadas, a escala 1:50.000, por ser a maior, torna a diferença entre os MDEs mais clara, sendo possível caracterizar diferenças pontuais entre eles. Já na escala de 1:450.000 ocorre o inverso, com menos detalhes visuais as diferenças não são nítidas e/ou sentidas. Esse processo conhecido como simplificação cartográfica torna características como efeito dossel e falso-canal menos perceptíveis. A Tabela 2 exhibe a totalidade das feições identificadas nos 3 grupos de amostras, dessa forma, resulta em 93 quadrantes analisados. A quantificação considerou os três grupos de amostras (1, 2, 3). Os quadrantes onde o dossel da vegetação e/ou as características do terreno ocasionaram em erro no MDE foram tabulados juntos, respectivamente “Efeito dossel/Falso canal”.

Tabela 2 - Feições identificadas na análise da extração automática de rede de drenagem por parte dos MDEs.

Feições	Escala				
	1:50.000	1:100.000	1:150.000	1:200.000	1:450.000
	Nº de quadrante (%)				
Drenagem adequada: linha processada (ASTER-GDEM, TOPODATA e/ou SRTM-4) compatível com o curso d’água	33 (35,5)	33 (35,5)	34 (36,6)	36 (38,7)	46 (49,5)
Drenagem inadequada: linha	36 (38,7)	34 (36,6)	33 (35,5)	30 (32,3)	25 (26,9)

processada incompatível com o curso d'água					
Drenagem com acerto parcial	17 (18,3)	16 (17,2)	17 (18,3)	18 (19,3)	12 (12,9)
Quadrante sem linha de escoamento	7 (7,5)	7 (7,5)	8 (8,6)	9 (9,7)	9 (9,7)
Total	93	93	93	93	93

As maiores escalas (1:50.000 e 1:100.000) confundem mais em alguns aspectos devido à riqueza de detalhes evidenciados, por estarem mais próximo do objeto. Em contraponto, as menores escalas confundem a interpretação por terem a visualização mais distante do objeto, tornando mais difícil a especificação de cada alvo. Isto ocorre, por exemplo, na visualização de quadrantes que contém linhas de escoamento, a variação de número de quadrante sem linha de escoamento nas diferentes escalas é em função dos traços de drenagem se tornarem menos perceptíveis nas menores escalas. Por mais que se tenha mantido o mesmo padrão de interpretação das amostras, com as mudanças de escala de visualização, feições de mesmos aspectos estavam sujeitas a diferentes percepções, em virtude do processo de generalização cartográfica.

Em alguns locais, as linhas de drenagem estão relacionadas a canais secos de drenagem, ou seja, canais por onde correm as águas precipitadas. A distinção das feições que representam cursos d'água e as que são efeito dossel e/ou falso-canal tornaram-se menos perceptível em escalas menores, não sendo possível individualizar a ocorrência destes, em consequência disto, o percentual de drenagem inadequada caiu de 38,7% na escala de 1:50.000 para 26,9% na escala de 1:450.000. Isso induziu positivamente o resultado dos MDEs, pois, a interpretação visual é comprometida pelo tamanho da escala de visualização.

As áreas de drenagem considerada adequada foi relativamente alta na escala de 1:450.000, com 49,5% obteve-se quase metade de quadrantes com acerto, entretanto, ressalta-se que esse percentual é somatório de todos os quadrantes onde um ou outro MDE processou linha de escoamento.

O efeito visual da escala é nítido em todos os critérios avaliados, utilizando-se dos quadrantes com drenagem adequada e inadequada é possível observar que o fator de desacerto da rede de drenagem extraída automática é minimizado pela redução da escala, sendo possível observar a transição desta redução nas cinco escalas utilizadas.

O fator da escala também foi ponderado de maneira individual, com a avaliação de quadrantes onde o MDE gerou linhas de drenagem (Tabela 3). As características naturais e os efeitos da interpretação visual atrelado ao processo de generalização

cartográfica refletiram no número de quadrantes onde os MDEs geraram linhas correspondentes a cursos d'água.

Tabela 3 – Linhas da rede de drenagem do MDE compatíveis com o curso d'água.

Escala	MDE – N° de quadrantes com linhas processadas compatíveis ao curso d'água.		
	ASTER-GDEM	TOPODATA	SRTM-4
1:50.000	15	20	7
1:100.000	15	22	7
1:150.000	17	22	9
1:200.000	19	22	9
1:450.000	25	29	22

Considerando os dados da Tabela 3, o aproveitamento individual dos MDEs foi considerado baixo, isso porque, mesmo considerando a menor escala analisada (1:450.000), onde os dados sofrem o processo de generalização cartográfica e é a mais sujeita ao processo de simplificação cartográfica, o melhor aproveitamento foi do TOPODATA com um total de 29 quadrantes que apresentaram linhas processadas consideradas adequadas com o curso d'água. Ressaltando-se que a performance de cada MDE foi avaliada considerando o desempenho dentro do quadrante, e, para isto, foram considerados somente os quadrantes onde havia curso d'água, dessa forma, foram considerados um total de 86 quadrantes válidos.

O MDE que sofreu de maneira mais positiva com a redução da escala foi o SRTM-4, visto que, os quadrantes onde a sua linha de drenagem passou a ser considerada correspondente a curso d'água subiu de nove na escala de 1:200.000 para 22 na escala de 1:450.000. Na simplificação cartográfica, detalhes de feições individuais ou similares sofrem um processo de redução, assim a falta de detalhamento do SRTM-4 que é perceptível em escalas maiores com a redução da escala tornou-se imperceptível.

Como descrito por D'Alde e Goodchild (1996), a generalização cartográfica envolve muita intuição e pouca formalização, compreendendo um processo de seleção de objetos que leva em conta uma certa hierarquia de importância. Nesse processo de seleção do objeto, os aspectos como posição relativa, forma e tamanho dos vetores serviram como critérios de avaliação.

A escala representa uma etapa fundamental a ser definida quando se trata de produtos cartográficos. A escolha de determinada escala pode resultar em alguns aspectos de generalização cartográfica, como simplificação e omissão dos dados. Em processos automáticos, como exemplo a extração de rede de drenagem, a densidade do produto gerado pode ser alterado em virtude de fatores como MDE, algoritmo utilizado para extração de drenagem, limiar considerado, entre outros, sendo que a

escala não é um fator que altera a densidade da rede de drenagem gerada, entretanto, a escala é um fator de representação determinante em qualquer mapa e por isto, é importante compreender como este fator altera a percepção visual de um determinado elemento.

Rede de drenagem dos MDE – Análise 2

A análise da rede de drenagem em sua totalidade proporcionou a visão do conjunto, sendo que cada MDE pode ter suas particularidades evidenciadas. O SRTM-4 teve predisposição para captar os cursos d'água de maiores ordens, cursos d'água como córregos que correspondiam aos afluentes dos principais cursos d'água da bacia não foram extraídos.

ASTER-GDEM e TOPODATA geraram mais linhas, formando um maior número de confluências no decorrer da rede de drenagem, tornando seus percursos mais segmentados. Os segmentos gerados pelo SRTM tendem a ser mais longos e retos, formando menos pontos de vértice. Isso ocorre, em parte, devido à resolução espacial deste MDE e do algoritmo D8. O problema do D8 é que ele só considera oito caminhos adjacentes e não a tendência geral do MDE (YANG et al., 2010b).

A resolução espacial implica no número de feições que podem ser criadas. Enquanto uma célula do SRTM-4 gera uma reta, ASTER-GDEM e TOPODATA podem gerar até nove direções para a mesma célula, já que 1 píxel de 90m corresponde a 9 píxeis de 30m. A Tabela 4 expõe o número de feições e atributos de cada MDE:

Tabela 4 - Atributos gerados pelos MDEs. Cada segmento de linha foi denominado de feição, enquanto, o que a linha representava no terreno foi chamado de atributo.

MDE	Nº de feições de escoamento gerados	Linhas de escoamento processadas* (km)	Atributos Gerados			
			Falso canal	Efeito Dossel	Falso-canal / Efeito Dossel	Total
SRTM-4	83	354	09	03	10	22
ASTER-GDEM	897	1135	242	65	138	445
TOPODATA	875	1070	239	107	132	478

*A rede hidrográfica da bacia possui uma extensão de 658 km.

Os locais onde ocorreram a geração de mais de uma linha paralela ao curso d'água, ou aonde as linhas vão além destes, foram quantificadas à terceira situação (Efeito dossel/ Falso canal) como linhas de escoamento divergentes do corpo d'água. As regiões onde as faixas de vegetação são mais densas e o relevo é mais plano foram

mais propícias para a criação de linhas paralelas ao longo do curso fluvial, em algumas situações, formando linhas paralelas em ambas às margens do curso d'água.

Como já mencionado na análise da escala, há dificuldade de definir as nascentes, e isso influencia no percentual de linhas de escoamento que divergem da drenagem. Essa divergência ocorre tanto com a extrapolação do canal quanto com a redução deste. Em um processo de simplificação, os erros são inevitáveis e a qualidade da informação extraída do MDE está associada ao erro atrelado a este (Figura 4).

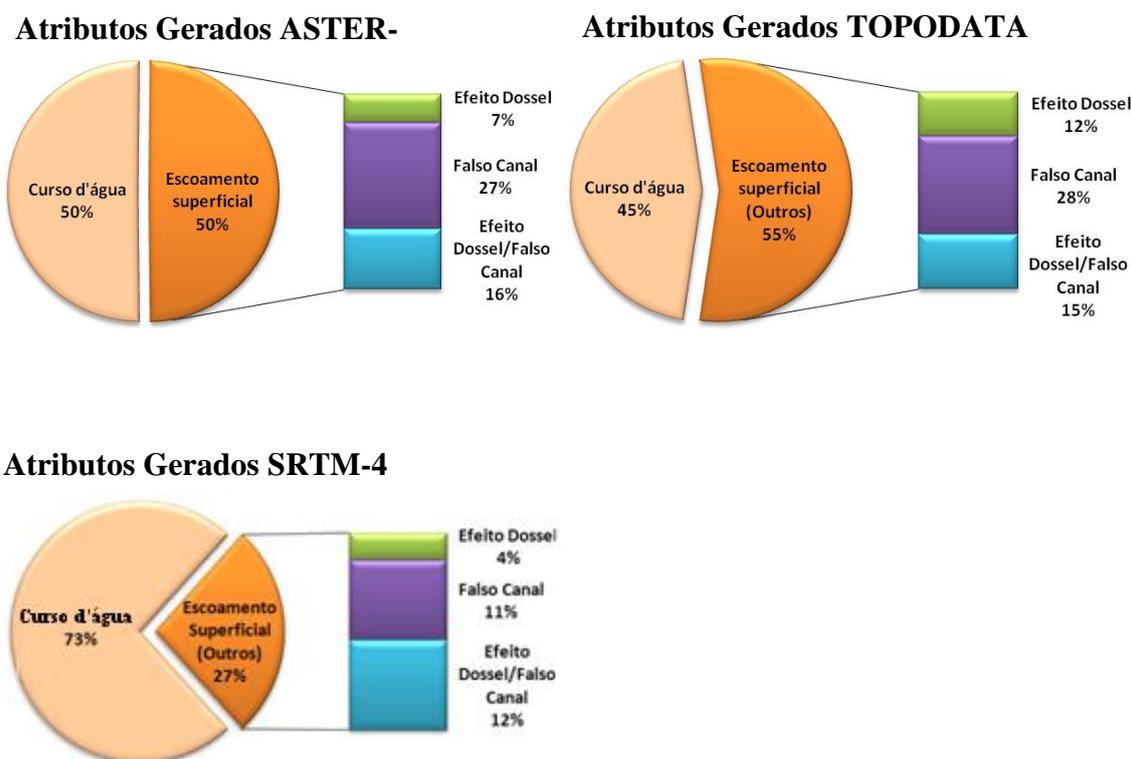


Figura 4 - Resultado da avaliação dos segmentos de cada MDE. Atributos gerados: ASTER-GDEM, TOPODATA e SRTM-4. Percentual total da avaliação em toda a extensão da rede de drenagem gerada de forma automática.

Mesmo o SRTM-4 apresentando menor extensão que a malha hidrográfica, 27% da linha de escoamento gerada por este MDE corresponde a efeito dossel e/ou falso canal. Isso ocorre porque apesar de se ter a maior drenagem delineada de forma satisfatória (73% de precisão), canais espúrios de fluxos são gerados e ocorre falta de informação detalhada.

Por gerar mais feições de escoamento, o ASTER-GDEM e TOPODATA estavam passíveis de duas situações: errar e/ou acertar mais. Diferentemente do que ocorreu na análise de escalas, o ASTER-GDEM teve melhores resultados que o

TOPODATA. Todavia, a diferença percentual entre ASTER-GDEM e TOPODATA na análise da rede de drenagem foi pequena, sendo de apenas 5%.

Apesar das particularidades de cada MDE, as características do terreno foram sentidas de forma muito próxima entre ASTER-GDEM e TOPODATA, tanto que as diferenças de “Falso Canal” nos dois foram de apenas 1%, fato que se repete na relação “Efeito Dossel/Falso Canal”. As especificações dos MDEs foram mais significativas em “Efeito Dossel”. As feições geradas em decorrência da copa das árvores foram bem mais sentidas no TOPODATA, sendo que 12% do erro deste MDE deriva desse aspecto, isso faz com que ASTER-GDEM tenha uma precisão maior que TOPODATA. O acerto em relação ao escoamento superficial que corresponde ao curso d’água foi de 50% no ASTER-GDEM. O “Efeito Dossel” chama atenção não só no TOPODATA, mas também no SRTM-4. Apesar de ASTER-GDEM criar 10x mais feições que SRTM-4, e por isso estar mais propício ao erro, somente 7% das suas feições foram aludidas como efeito dossel, contra 4% no SRTM-4.

Considerações finais

Em pequenas escalas ($>1:500.000$), onde alguns objetos tornam-se imperceptíveis ao olho humano, a utilização dos MDEs para obtenção de rede de drenagem de forma automática é um recurso plausível, além de maximizar tempo. Quando utilizada a extração de drenagem automática em escalas grandes ($<1:100.000$), deve-se atentar para qual finalidade pretende-se aplicar os dados. A menor escala utilizada no trabalho representa uma escala média ($1:450.000$), e, mesmo nela, foi possível mensurar os desencontros da rede de drenagem do MDE com os cursos d’água.

Isto significa que a aplicação de MDEs para modelar redes de drenagem em micro bacias hidrográficas podem ser inapropriadas em algumas situações. A modelagem de redes de drenagens por extração automática em bacias hidrográficas com utilização de escalas pequenas permitiu a visualização de dados que não correspondem a cursos d’água. A premissa feita foi considerando MDEs com resoluções espaciais $\Rightarrow 30m$.

A especificação com escala buscou mostrar a interferência deste elemento para um dado gerado de forma automática. Em todas as situações, o dado gerado é o mesmo, entretanto, a representação do dado é o que torna o produto viável ou inviável em determinadas situações. Ou seja, independente da escala de representação, a rede de

drenagem extraída automaticamente gerou artefatos, entretanto, estes artefatos em uma grande escala não foram tão perceptíveis quanto em uma pequena escala.

Nas duas análises realizadas foi possível quantificar o que representava artefato e o que correspondia a cursos d'água, e ao contrário do que se esperava, a baixa resolução espacial do SRTM-4 contribuiu para que este MDE fosse o que gerasse menos dados de drenagem imprecisos. Entretanto, os dados gerados através deste MDE não foram adequados para captar cursos d'água de 1ª ordem, que correspondem a pequenos canais fluviais (córregos, riachos).

Se o propósito do operador para a geração dos dados de drenagem fosse modelar os cursos d'água de uma microbacia, possivelmente o SRTM-4 seria o MDE menos apropriado, pois deixaria de gerar dados de pequenos cursos d'água. Entretanto, se a intenção do operador fosse aplicar os dados de MDE que reduzisse ao máximo possível a geração de artefatos na modelagem dos cursos d'água, possivelmente o SRTM-4 seria o MDE mais apropriado, pois foi o MDE que gerou menos artefatos na rede de drenagem produzida. A exemplificação descrita foi feita somente para elucidar o quão importante é o conhecimento da finalidade em que o dado será empregado. A mesma situação pode ser empregada para a escala de representação dos dados.

Quanta a nomenclatura aplicada para os produtos utilizados, apesar deste trabalho ter adotado o termo MDE, menciona-se que o mais adequado a estes produtos é o termo Modelo Digital de Superfície (MDS), pois os resultados mostraram que os dados de altitude dos produtos são influenciados pelos alvos mais altos do terreno, como o dossel da vegetação, e não estão relacionados a superfície nua do solo. E isto, resultou em desacertos dos modelos com a malha hidrográfica da bacia, situação acentuada em margens de cursos d'água onde a cobertura vegetal foi superior a resolução horizontal do produto.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao apoio da Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul-UFMS/MEC – Brasil. E ao CNPq pela concessão de Bolsa Produtividade em Pesquisa a Antonio Conceição Paranhos Filho (PQ-1D - CNPq Processo 304644/2022-6).

Effects of cartographic generalization on automated drainage network extraction

Abstract: Through Digital Elevation Models (DEM) it is possible to perform the automatic drainage network extraction, which besides being a fast procedure it is the basis for generating other data in hydrological studies. However, with the advancement in the geotechnology and the increase in available digital products, many data are automatically generated disregarding data sampling characteristics. In this work, the sampling factor considered for the drainage network were two: scale representation and DEM influence. In order to do this, three DEMs were selected: ASTER-GDEM, TOPODATA and SRTM-4; and five scale representations: 1/50,000; 1/100,000; 1/150,000; 1/200,000 and 1/450,000. The drainage network was analyzed in two ways: by samples and by population analysis. According to the analysis by samples, the most satisfactory results were in the 1/450,000 scale, in which the DEMs demonstrated a higher accuracy rate (compatible design to water channels). In the larger scales (1/50,000 and 1/100,000) the mismatches between automatic extraction and watercourse are more perceptible to the human eye, which influenced the evaluation of areas with satisfactory results for watercourse delineation. In the population analysis, the scale factor was disregarded and the SRTM-4 was the DEM that obtained greater accuracy: 73% of regularity with watercourses.

Keywords: Scale; Canopy effect; Formoso River; Remote Sensing.

Efectos de la generalización cartográfica en la extracción de la red de drenaje generada automáticamente

Resumen: A través de los Modelos Digitales de Elevación (MDE), es posible realizar la extracción automática de la red de drenaje, que además de ser un procedimiento rápido, es la base para la generación de otros datos en estudios hidrológicos. Sin embargo, con el avance de las geotecnologías y el aumento de los productos disponibles en formato digital, se generan muchos datos automáticamente, sin tener en cuenta las características del muestreo de estos datos. En este trabajo, las características de muestreo consideradas para la red de drenaje fueron dos: escala de visualización e influencia del MDE. Para esto, se utilizaron tres MDE: ASTER-GDEM, TOPODATA y SRTM-4; y cinco escalas de representación: 1 / 50,000, 1 / 100,000, 1 / 150,000, 1 / 200,000 y 1 / 450,000. La red de drenaje se analizó desde dos perspectivas: por muestras y por análisis de población. Según el análisis basado en la escala, los resultados más satisfactorios se dieron en la escala 1 / 450,000, que es la escala donde los MDE tuvieron la mayor tasa de precisión (diseño compatible con los canales de la red de drenaje). En escalas cartográficas mayores (1 / 50,000 y 1 / 100,000) los desajustes entre la extracción automática y el canal de agua son más notorios para el ojo humano, lo que influyó en la evaluación de áreas con resultados satisfactorios para la delineación de cursos de agua. En el análisis de la población no se tuvo en cuenta el factor de escala y el SRTM-4 fue el MDE que obtuvo la mayor precisión: 73% de regularidad con los cursos de agua.

Palabras clave: Escala; Efecto de dossel; Formoso Rio; Detección Remota.

Referências

ABRAMS, M.; HOOK, S.; RAMACHANDRAN, B. **ASTER Users Handbook**. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, v.2, p.135, 2002. Disponível em: < https://lpdaac.usgs.gov/documents/262/ASTER_User_Handbook_v2.pdf >. Acesso em Julho de 2014.

AKRAM, F.; RASUL, M. G.; KHAN, M. M. K.; AMIR, M. S. I. I. **Automatic delineation of drainage networks and catchments using DEM data and GIS capabilities: a case study**. In: AUSTRALASIAN FLUID MECHANICS CONFERENCE LAUNCESTON, 18., Launceston, UTAS, 2012, p. 3-7.

CORDEIRO, G. M. Cronologia de alguns conceitos e fatos importantes da estatística. 2006. Disponível em: < www.im.ufrj.br/~flavia/mad236/cronologiaGauss.doc>. Acesso em agosto de 2014.

D'ALGE, J. C. L.; GOODCHILD, M. F. **Generalização Cartográfica, Representação do Conhecimento e SIG**. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 8., Salvador, BA, 1996. *Anais do VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. São José dos Campos, SP: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, 1996. p. 453-457.

ESRI. ArcMap. (2012). V.10.1. USA. DVD ROM.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. INPE. **RESOURCESAT-1 LISS3 Bandas 2, 3 e 4**. São José dos Campos Imagem de Satélite. **Órbita 321 ponto 093**. Disponível em: < <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>>. Acesso em Junho de 2012.

KENWARD, T.; LETTENMAIER, D. P.; WOOD, E. F.; FIELDING, E. Effects of digital elevation model accuracy on hydrologic predictions. **Remote Sensing of Environment**, v.7, n.3, p.432-444, 2000.

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

National Aeronautics and Space Administration. NASA. **Shuttle Radar Topography Mission: the mission to map the world**. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. 2009. Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>. Acesso em Maio de 2013.

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. 323-344, 1984.

PATEL, A.; KATIYAR, S. K.; PRASAD, V. Performances evaluation of different open source DEM using Differential Global Positioning System (DGPS). **The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science**, v.19, n.1, p.7-16, 2016.

REINOSO-GORDO, J. F.; IBÁÑEZ, M. J.; ROMERO-ZALIZ, R. Parallelizing drainage network algorithm using free software: Octave as a solution. **Mathematics and Computers in Simulation**, v.137, p. 424-430, 2017.

SHIMAKURA, S. E. Teorema Central do Limite. 2009. Disponível em: <<http://leg.ufpr.br/~silvia/CE001/node38.html>>. Acesso em agosto de 2014.

TARBOTON, D. G.; BRAS, R. L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. On the extraction of channel networks from digital elevation data. **Hydrological Processes**, v.5, n.1, p.81-100, 1991. doi:10.1002/hyp.3360050107

TERUYA JUNIOR, H.; LASTORIA, G.; PARANHOS FILHO, A.C.; DALMAS, F.B.; CORREA, L.C. Mapeamento das APP's de hidrografia e declividade como subsídio a gestão da Bacia Hidrografia do Rio Formoso (Mato Grosso do Sul). **Revista Geociências**, v. 15, n.2, p.128-140, 2016.

TRIBE, A. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method. **Journal of Hydrology**, v.139, n.1-4, p.263-293, 1992.

United States Geological Survey. USGS. **Digital Elevation Model**. 2003. Disponível em:<<http://geography.wr.usgs.gov/sfcreek/dem.html>>. Acesso em Setembro de 2012.

VALERIANO, M. M.;ROSSETTI, D. F. **Topodata: Seleção de coeficientes geoestatísticos para o refinamento unificado de dados SRTM**. INPE, São José dos Campos, 2010. Disponível em: <<http://mtc-m16d.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/05.10.18.35/doc/publicacao.pdf>>. Acesso em Março de 2015.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, v.32, n.2, p.300-309, 2012.

YANG, W.; HOU, K.; YU, F.; LIU, Z.; SUN, T. A. Novel algorithm with heuristic information for extracting drainage networks from raster DEMs. **Journal Hydrology and Earth System Sciences**, v.7, p.441-459, 2010.

WANG, X.; YIN, Z. Y. A comparison of drainage networks derived from digital elevation models at two scales. **Journal of Hydrology**, v.210, n.1-4, p.221-241, 1998.

Luciana Escalante Pereira – Graduada em Gestão ambiental. Mestre em Doutora em Tecnologias Ambientais da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

César Claudio Cáceres Encina - Graduado em Ciências Biológicas. Mestre em Biologia Vegetal. Doutorado em tecnologias ambientais pela Universidade Federal de Mato Grosso do Sul.

Antônio Conceição Paranhos Filho - Professor Titular da Universidade Federal de Mato Grosso do Sul. Graduado, mestre e doutor em Geologia.

Recebido para avaliação em novembro de 2023

Aceito para publicação em maio de 2024