

Análise da precisão entre os métodos de interpolação Krigagem Ordinária e Topo to Raster na geração de modelos digitais de elevação

Hugo Alexandre Soares Guedes ¹
Gabriela Vieira Capobianco ¹
Vitor Souza Martins ¹
Demetrius David da Silva ¹

¹ Universidade Federal de Viçosa – UFV/DEA/CRRH
Av. Ph. Holfs s/n - 36570-000 - Viçosa - MG, Brasil

hugo.guedes@ufv.br; gabicapobianco@yahoo.com.br; vitormartins9@hotmail.com;
demetrius@funarbe.org.br

Abstract. This paper aims to analyze the accuracy of Ordinary Kriging system and Topo to Raster interpolation methods in generation of digital elevation models by using statistical analysis and cross-validation in the watershed of São Bartolomeu stream, located in Viçosa/MG. In order to obtain the digital elevation models (DEMs) were used contour lines, arcs mapped hydrography, limits that define the extent of the study area and the highest points of relief. The processing and analysis of spatial data were performed in ArcGIS software, version 9.3, while the statistical analyses were undertaken in the software Statistica, version 7.0. Two DEMs were generated using Topo to Raster interpolation and one DEM using Ordinary Kriging system interpolation. The MDE standard, used for comparison purposes, was generated using all available input data, while the others were generated only with the highest points of relief. The statistical parameter used in the study was the Root Mean Square Error (RMSE) and cross-validation was performed by comparing visually the contour lines of the DEMs evaluated with a contour lines map. The DEM generated using Ordinary Kriging system interpolator showed the highest index value of RMSE and also presented the greatest topological distortions evidenced in the cross-validation. Thus, the Topo to Raster method was assessed as the best interpolation algorithm, even when all input data that it allows was not used.

Palavras-chave: GIS, geostatistics, hydrological studies, SIG, geoestatística, estudos hidrológicos.

1. Introdução

O modelo digital de elevação (MDE) consiste em um padrão de dados pontuais que, por terem suas coordenadas tridimensionais conhecidas, consegue representar a superfície do terreno (Algarni e Hassan, 2001). A estrutura simples e ampla fez dos MDEs ferramentas populares para a caracterização do terreno (Chaplot et al., 2006). Segundo Pires et al. (2005), é comprovado que, ao serem utilizados em conjunto com o Sistemas de Informações Geográficas (SIG) facilitam o reconhecimento automático de feições do terreno, trazendo resultados menos subjetivos, em menor tempo e aplicáveis, comparado aos obtidos por métodos manuais.

A qualidade de MDEs é intrínseca e fundamental para o sucesso das abordagens, principalmente para modelagem hidrológica. Vários fatores afetam a qualidade dos MDEs, como a tecnologia aplicada para coleta de dados, estrutura espacial da altitude e da técnica de interpolação (Chaplot et al., 2006).

A geoestatística vem apresentando aplicação crescente na avaliação da variabilidade espacial de parâmetros de interesse em ciências agrárias, permitindo o mapeamento, a quantificação e a modelagem de fenômenos contínuos, através de interpolação dos pontos amostrados no espaço (Souza et al., 1998). Os interpoladores, por sua vez, são ferramentas matemáticas que atribuem valores relativos a alguma variável em pontos inseridos em um campo de valores já existente, transformando dados discretos em contínuos (Castro et al., 2010).

A escolha da técnica de interpolação entre os dados de amostragem inicial de pontos de altitude deve ser feita com cautela. Existem muitas técnicas de interpolação, que

desempenham diferentes precisões dependentes do contexto inserido, mas a maioria delas tem por objetivo a minimização do erro quadrático médio, ou seja, o desvio padrão das diferenças de altitude (Algarni e Hassan, 2001). Comparando-se as técnicas de Krigagem Ordinária e a função Topo to Raster, nota-se que essa última tem como vantagem permitir que arquivos de entrada, como curvas de níveis, cursos de rios e delimitações de bacias, possam ser utilizados durante a interpolação. Diferentemente, o método de Krigagem trabalha somente com pontos, porém é conhecido como o melhor estimador linear para locais não amostrados (Erxleben et al., 2008).

De acordo com o exposto, este trabalho teve como objetivo analisar a precisão dos métodos de interpolação Krigagem Ordinária e Topo to Raster na geração de modelos digitais de elevação por meio de análise estatística e validação cruzada na bacia do ribeirão São Bartolomeu, situada no município de Viçosa/MG.

2. Metodologia

2.1 Área de estudo

A área selecionada para realização deste estudo foi a bacia do ribeirão São Bartolomeu. Esta bacia está localizada na Zona da Mata Mineira, mais precisamente no município de Viçosa-MG, e inserida na bacia hidrográfica do rio Doce (Machado et al., 2010). Localiza-se entre os paralelos 20°44' e 20°50' latitude sul e os meridianos 42°51' e 42°53' longitude oeste de Greenwich (Figura 1).

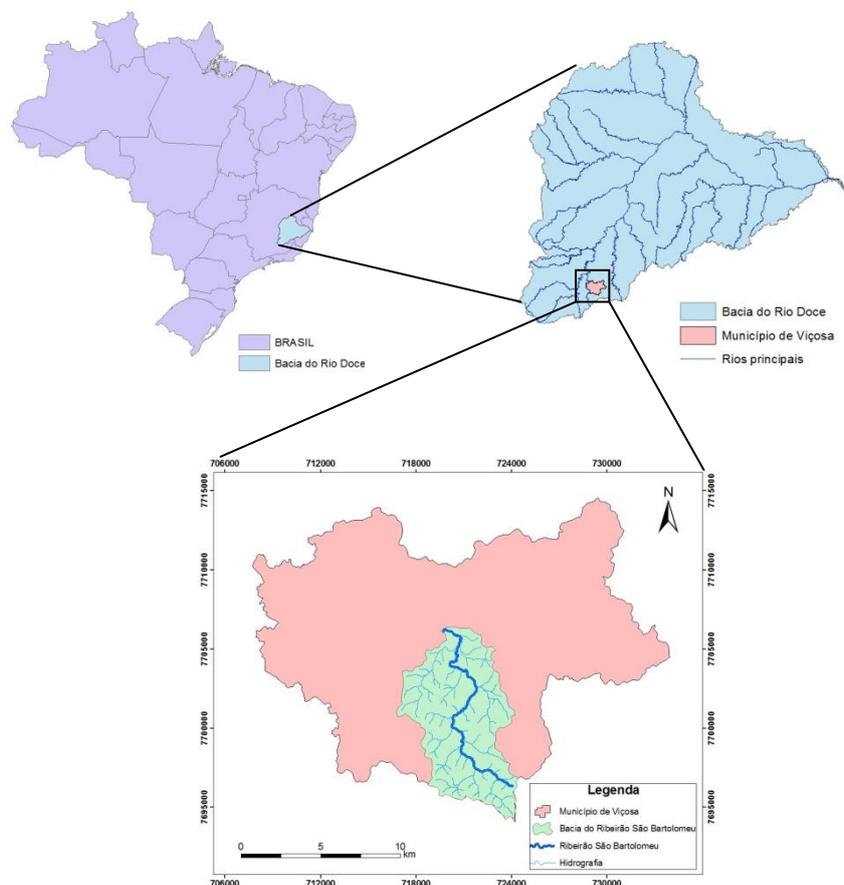


Figura 1. Localização geográfica da bacia do ribeirão São Bartolomeu.

Esta sub-bacia é formada pelos córregos Santa Catarina, Engenho, Posse, Araújo e Palmital, apresentando área de drenagem de, aproximadamente, 55,1 km², o que representa cerca de 18,4% da superfície do município de Viçosa.

A sua escolha deu-se, principalmente, em função de ser uma área muito estudada e conhecida, da qualidade, confiabilidade e disponibilidade de dados altimétricos (Pires et al., 2005).

2.2 Material

Para a obtenção dos modelos digitais de elevação foram utilizadas curvas de nível com equidistância vertical de 20 m, produzidas por restituição manual de fotografias aéreas na escala de 1:50.000; os arcos da rede hidrográfica mapeada; o limite que define a extensão da área de estudo; e os pontos mais elevados do relevo (pontos cotados).

Utilizaram-se as cartas topográficas digitais de Teixeiras (SF-23-X-B-V-1) e Viçosa (SF-23-X-B-V-3) para a individualização da bacia do ribeirão São Bartolomeu, as quais encontram-se disponíveis no site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), no formato digital, em sistema de coordenadas projetadas UTM (Universal Transversa de Mercator), Zona 23 sul, Datum de referência SAD 69 (South American Datum) e unidades horizontais em metros.

O processamento e análise dos dados foram realizados nos módulos ArcMap e ArcScan do software ArcGIS[®], versão 9.3 da Environmental Systems Research Institute, Inc. (ESRI). As análises estatísticas foram realizadas no software Statistica[®], versão 7.0 da Statsoft, Inc.

2.3 Métodos

A etapa inicial consistiu na preparação e seleção dos dados a serem utilizados pelas técnicas de interpolação propostas nesse estudo. Foram testados os métodos de Krigagem Ordinária e a função Topo to Raster.

Devido às limitações do algoritmo de Krigagem Ordinária em aceitar somente pontos como dados de entrada foi necessário converter as curvas de nível para o modelo matricial, com resolução de 10 metros e, posteriormente, para feições do tipo ponto no formato vetorial, assim como a metodologia aplicada por Pires et al. (2005).

Como as curvas de nível foram mapeadas com base em um mapa com escala de 1:50.000, e considerando-se o erro gráfico para visão humana de 0,2 mm, os MDEs foram gerados com células de 10 m (Mendonça, 2007). Este valor foi encontrado multiplicando-se o valor do erro gráfico pelo fator de escala.

Como o algoritmo Topo to Raster possibilita a utilização de múltiplos arquivos de entrada, como curvas de nível, hidrografia, pontos cotados e delimitações de bacias, geraram-se dois MDEs: o primeiro utilizando todas as informações disponíveis na bacia do ribeirão São Bartolomeu (curvas de nível, hidrografia, pontos cotados e contorno da bacia) – Topo to Raster padrão; e, o segundo, apenas com os pontos advindos do processamento das curvas de nível – Topo to Raster condicionado. Esse procedimento visa fornecer as mesmas condições usadas pelo método de Krigagem Ordinária para assim poder avaliá-los nas mesmas situações.

Segundo Cuartero et al. (2001), a avaliação da precisão dos modelos digitais de elevação gerados a partir dos diferentes algoritmos de interpolação pode ser realizada por simples reconhecimentos visuais, validação cruzada baseadas em relações de vizinhança, superposição de curvas de nível e pela comparação estatística com pontos de controle, analisando a inexistência de erros sistemáticos e presença de erros aleatórios. Dessa maneira, considerando os pontos cotados selecionados nas cartas topográficas do IBGE e as curvas de nível mapeadas, optou-se pelas análises de cruzamento e estatística.

A análise de cruzamento foi realizada comparando-se as curvas de nível dos MDEs avaliados com as curvas de nível mapeadas. Essa objetivou avaliar visualmente o nível de coincidência por meio da sobreposição de células. Para tanto foram geradas as curvas de nível, de 20 em 20 metros, pelo comando Countour da extensão *Spatial Analyst*.

Na análise estatística obtiveram-se os valores derivados a partir da diferença entre os modelos digitais de elevação e a utilização de 60 pontos de elevação (pontos cotados), admitidos neste estudo como verdade de campo. Nessa, foram calculados a média, os valores mínimos e máximos, o desvio padrão e a raiz do erro médio quadrático (RMSE).

De acordo com Chagas et al. (2010), a medida da qualidade de MDEs é usualmente apresentada na forma do RMSE da elevação, obtido conforme a Equação 1.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n d_i^2}{n}} \quad (1)$$

em que d é a diferença de elevação entre os MDEs avaliados e os pontos cotados, e n é o número de pontos de elevação testados.

Segundo Holmes et al. (2000), o RMSE é medido a partir de pontos de amostra discretos e é comumente utilizado para estimar o erro ou a incerteza nos locais em que o erro não foi medido diretamente. Para um MDE, o RMSE se refere ao grau de diferença entre os valores interpolados e os valores de elevação mais prováveis, de modo que o termo elevação verdadeira não deve ser utilizado já que, normalmente, este é considerado desconhecido.

3. Resultados e Discussão

A preparação dos dados, no que diz respeito à hidrografia e às curvas de nível, garantiu o correto sentido do escoamento dos cursos d'água, como também o correto posicionamento das curvas de nível em relação à rede de drenagem. O correto sentido do escoamento, assim como a obtenção de pontos cotados e a compatibilização entre hidrografia e curvas de nível, foi necessário para atender o pré-requisito do interpolador Topo to Raster. Na Figura 2 está apresentado um mapa com as feições vetoriais das cartas topográficas utilizadas na geração do modelo digital de elevação.

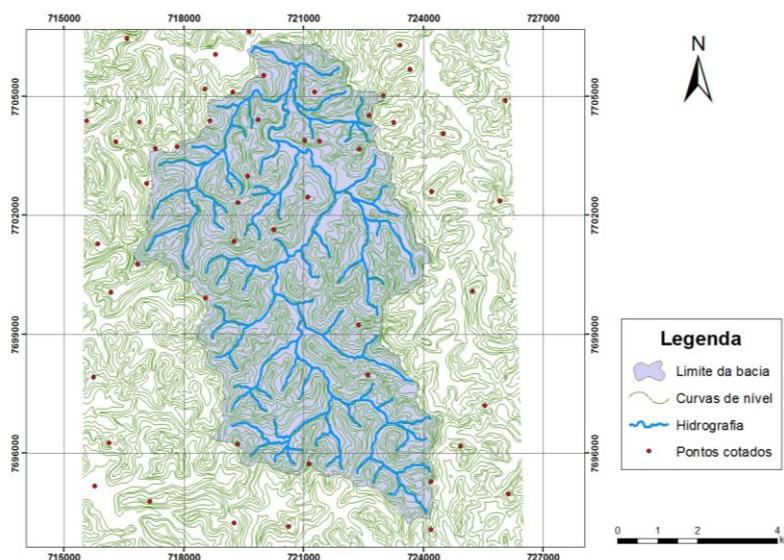


Figura 2. Hidrografia, curvas de nível e pontos cotados da bacia do ribeirão São Bartolomeu após a preparação dos dados.

Observa-se na Figura 2 que as curvas de nível foram vetorizadas além dos limites de contorno da bacia, objetivando melhor interpolação nas linhas do divisor de águas. Além do mais, considerou-se uma quantidade maior de pontos cotados tornando os resultados estatísticos mais confiáveis.

Na Figura 3 estão apresentados os modelos digitais de elevação gerados pelos interpoladores para a região de estudo e na Tabela 1 a área correspondente em cada faixa de elevação.

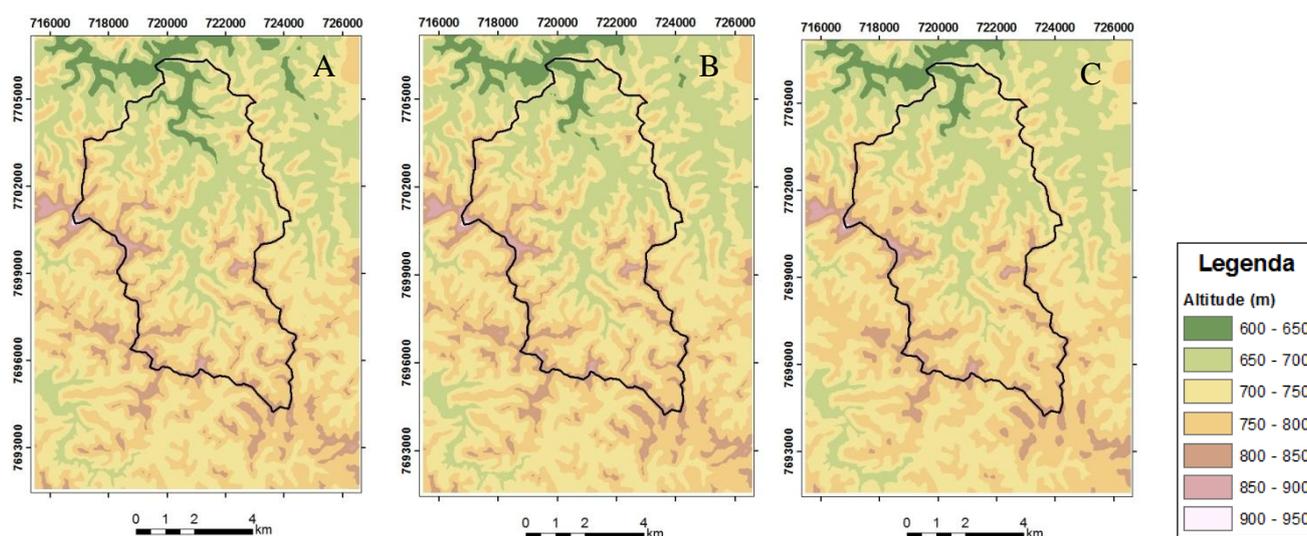


Figura 3. MDEs gerados para a região de estudo: A – MDE padrão (Topo to Raster padrão); B – MDE condicionado (Topo to Raster condicionado) e C – MDE krigado (Krigagem Ordinária).

Tabela 1. Porcentagem da área da bacia em cada faixa de elevação

Altitude (m)	% da área total		
	MDE padrão	MDE condicionado	MDE krigado
600 – 650	3,85	3,18	2,97
650 – 700	21,56	22,30	23,18
700 – 750	38,43	38,15	37,62
750 – 800	27,92	28,14	29,85
800 – 850	7,50	7,52	5,74
850 – 900	0,71	0,68	0,62
900 – 950	0,03	0,03	0,02

Analisando a Figura 3 juntamente com a Tabela 1 observa-se boa concordância entre os resultados obtidos com o interpolador Topo to Raster padrão e condicionado. Mesmo não sendo utilizado com todas as variáveis de entrada que esse permite os resultados ficaram muito próximos. Resultados semelhantes foram encontrados por Pires et al. (2005) em análises de exatidão de diversos interpoladores na geração de modelos digitais de elevação. Os autores confirmaram que o interpolador Topo to Raster, anteriormente conhecido como TOPOGRID (ArcInfo/Workstation), foi o que apresentou melhores resultados, mesmo não sendo utilizado com todas as alternativas de entrada.

Os resultados gerados pelo interpolador Krigagem Ordinária (Figura 3 e Tabela 1) mostraram uma tendência à suavização do relevo, apresentado nas áreas de maior elevação (800 – 850 m) e de picos (850 - 950) redução altimétrica. Entretanto, na área interna da bacia do ribeirão São Bartolomeu os valores altimétricos não apresentaram grandes diferenças.

Essas tendências vão ao encontro dos resultados observados por Nogueira e Amaral (2009), Valeriano (2004) e Jarvis et al. (2004). De acordo com Nogueira e Amaral (2009), a superfície gerada pela Krigagem cria uma forma de relevo mais uniforme. Devido esse fato, esse método é o mais utilizado na geração de superfícies de interpolação. Em compensação, não permite avaliar detalhes de estruturas discretas apresentadas no relevo como os possíveis canais de fluxo e corpos d'água. A mesma observação é feita por Cherem et al. (2009) sobre a utilização do interpolador Krigagem em imagens de sensoriamento remoto.

A validação cruzada foi realizada comparando as curvas de nível geradas pelos MDEs com as curvas de nível mapeadas do IBGE, conforme sugere Cuartero et al. (2001). Segundo Chagas et al. (2010), o objetivo que se busca na criação de um MDE é a obtenção de um modelo que contenha, o máximo possível, detalhes topográficos, preservando sempre as características do terreno. Assim, as curvas de nível derivadas, apresentando espaçamento de 20 m, generalizaram os dados em quantidades variadas. A melhor concordância com as curvas de nível mapeadas do IBGE foi obtida pelo MDE gerado pelo interpolador Topo to Raster padrão, conforme observado na Figura 4a. Esse resultado era esperado uma vez que uma das variáveis de entrada na geração do modelo foi a curva de nível mapeada do IBGE.

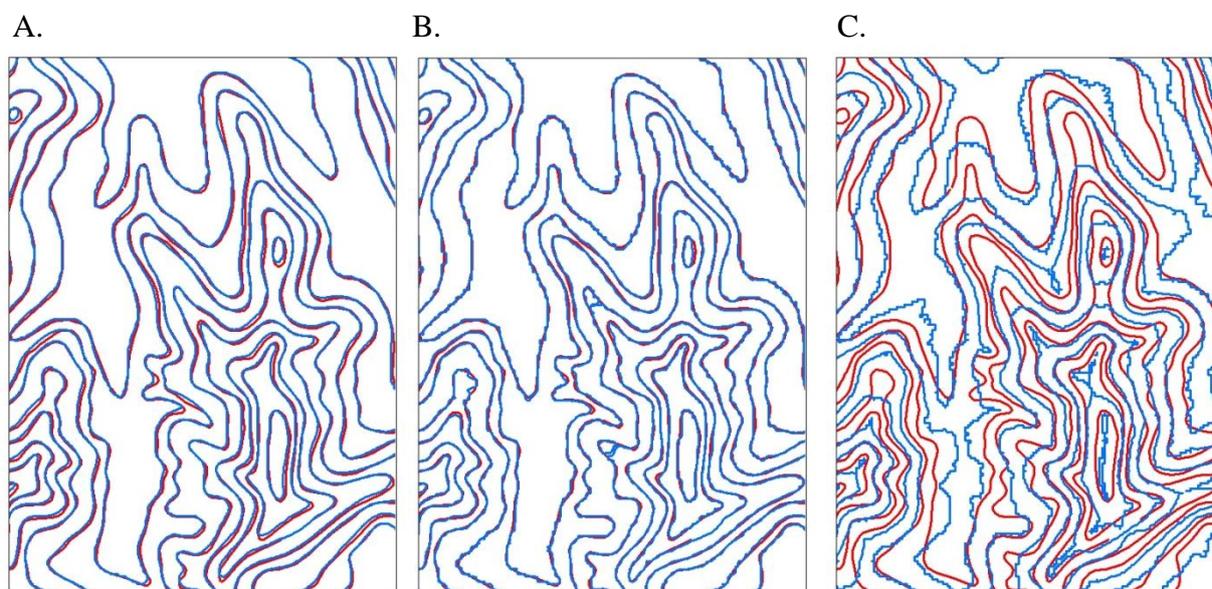


Figura 4. Curvas de nível derivadas (linha azul) versus curvas de nível mapeadas (linha vermelha), em partes dos MDEs avaliados: A – MDE padrão; B – MDE condicionado e C – MDE krigado.

As curvas de nível derivadas do MDE gerado pelo interpolador Topo to Raster condicionado apresentou pequenas variações com relação às linhas originais, entretanto, os picos e os contornos foram mantidos (Figura 4b), podendo o MDE condicionado ser considerado, portanto, de qualidade superior aos demais, para este critério.

O MDE krigado mostrou baixa concordância com as curvas de nível originais do IBGE, apresentado graves erros topológicos, como o cruzamento de curvas e a perda de informação nas grandes elevações (Figura 4c). Desse modo, quanto a esse critério, o MDE krigado possui qualidade inferior ao MDE condicionado.

Para verificar a eficiência e o nível de precisão dos interpoladores analisados nesse estudo realizou-se o cálculo das estatísticas descritivas e a Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE). Observando-se a Tabela 2, verifica-se que o Topo to Raster padrão foi o algoritmo que apresentou o menor resultado para o RMSE.

Tabela 2. Estatística descritiva e RMSE para as amostras do relevo

Interpolador	Diferença (m)		Desvio padrão	RMSE (m)
	Mínimo	Máximo		
MDE padrão	0,00	8,89	1,57	1,70
MDE condicionado	0,07	65,31	13,29	16,85
MDE krigado	0,00	79,00	14,53	20,48

Os resultados estatísticos confirmam os resultados encontrados pela validação cruzada, o qual indica que o interpolador Topo to Raster condicionado foi superior ao interpolador Krigagem Ordinária na região de estudo.

Os resultados obtidos nesse estudo estão condizentes com os resultados obtidos por Pires et al. (2005) e Barragán (2002) objetivando avaliar a qualidade de diferentes métodos de interpolação, classificando o Topo to Raster como o método de interpolação mais apropriado para obtenção de modelos digitais de elevação.

4. Conclusões

1. O método Topo to Raster foi avaliado como o melhor algoritmo de interpolação, mesmo não tendo sido utilizadas todas as alternativas de entrada que se permite.

2. As comparações das curvas de nível derivadas dos MDEs com a curva de nível mapeada indicam alta correlação com o Topo to Raster e baixa correlação com o interpolador Krigagem Ordinária, sendo necessários alguns procedimentos de pré e pós-tratamento para alcançar um nível de precisão e consistência topológica aceitável.

3. Recomendam-se mais estudos envolvendo a exatidão dos modelos gerados em estimar a rede de drenagem na bacia.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e pelo apoio financeiro desta pesquisa.

6. Referências bibliográficas

Algarni, D. A.; Hassan, I. E. Comparison of thin plate spline , polynomial, C^1 – function and Shepard's interpolation techniques with GPS-derived DEM. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v.3, n.2, p.155-161, 2001.

Barragán, J. M.; Baselga, J. P.; Preciado, F. P.; Gordilho, M. C. R.; Castillo, F. J. R. Análises de Calidad de Um Modelo Digital de Elevaciones Generado con Distintas Técnicas de Interpolación. In: XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica. Santander, España, 2002. *Anais... XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica*, p. 1-12. Disponível em: <<http://departamentos.unican.es/digteg/ingegraf/cd/ponencias/11.pdf>> Acesso em: 18 de outubro de 2010.

Castro, F. S.; Pezzopane, J. E. P.; Cecílio, R. A.; Pezzopane, J. R. M.; Xavier, A. C. Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, n.8, p.871-880, 2010.

Chagas, C.S.; Fernandes Filho, E.I.; Rocha, M.F.; Carvalho Júnior, W.de; Souza Neto, N.C. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação de um mapeamento digital de solos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, n.2, p.218-226, 2010.

Chaplot, V.; Darboux, F.; Bourennane, H.; Leguédou, S.; Silvera, N.; Phachomphon, K. Accuracy of interpolation techniques for the derivation of digital elevation models in relation to landform types and data density. **Geomorphology**, v.77, p.126-141, 2006.

Cherem, L. F. S.; Magalhães Júnior, A. P. ; Faria, S. D. . Krigagem do MDE-SRTM para a bacia do alto Rio das Velhas: avaliação morfológica e hidrológica do modelo. In: XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, 2009, Viçosa. **Anais... XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Aplicada**. Viçosa : UFV, 2009. v. unico. p. 100-115. Disponível em: <www.geo.ufv.br/simposio/simposio/trabalhos/.../056.pdf>. Acesso em: 18 de outubro de 2010.

Cuartero, A.; Felicísimo, A. M.; Ariza, F. J. Análisis del error en modelos digitales de elevaciones según la fuente de datos. In: XII Congreso Internacional de Espresión Gráfica, 2001, Badajoz. **Anais...** Disponível em: <www.ingegraf.es/congresos/2001-BADAJEZ/docs/730656.doc>. Acesso em 18 de outubro de 2010.

Erxleben, J.; Elder, K.; Davis, R. Comparison of spatial interpolation methods for estimating snow distribution in the Colorado Rocky Mountains. **Hydrological Process**, 16(18), 3627–3649. 2008.

Holmes, K.W.; Chadwick, O. A.; Kyriakidis, P. C. Error in a USGS 30-meter digital elevation model and its impact on terrain modeling. **Journal of Hydrology**, v.233, p.154-173, 2000.

Jarvis, A.; Rubiano, J.; Nelson, A.; Farrow, A.; Mulligan, M. **Practical use of SRTM data in the tropics – Comparisons with digital elevation models generated from cartographic data**. Cali:Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2004. 33p.

Machado, K. J.; Calijuri, M. L.; Ribeiro, C. A. A. S.; Santos, R. S. dos; Franco, G. B. Determinação automática da capacidade de armazenamento de um reservatório. **Revista Brasileira de Cartografia**, n.62 Edição Especial 01, 2010

Mendonça, L. E. R. de; Cerqueira, E. S. A.; Ribeiro, C. A. A. S.; Soares, V.P. Utilização de sistemas de informações geográficas (SIG) para delimitação e caracterização morfométrica da microbacia do córrego do Paraíso – Viçosa – MG. **Revista Ceres**, n.54, v.311, p.47-62, 2007.

Nogueira, J. D. de L.; Amaral, R. F. do. Comparação entre os métodos de interpolação (Krigagem e Topo to Raster) na elaboração da batimetria na área da folha Touros – RN. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 14, 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009: Artigos, p. 4117-4123. CD-ROM, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2007/biblioteca/>>. Acesso em: 18 de outubro de 2010.

Pires, J. M.; Nascimento, M. C.; Santana, R. M.; Ribeiro, C. A. A. S. Análise da exatidão de diferentes métodos de interpolação para geração de modelos digitais de elevação e obtenção de características morfométricas em bacias hidrográficas. **RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.10, n.2, p.39-47, 2005.

Souza, L. S.; Cogo, N. P.; Vieira, S. R. Variabilidade de fósforo, potássio e matéria orgânica em relação a sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p.77-86, 1998.

Valeriano, M. M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul**. São José dos Campos:INPE, 72p, 2004.