

Comparação entre métodos para geração de modelos digitais de elevação a partir de dados cartográficos

Moisés Pereira Galvão Salgado¹
Antônio Roberto Formaggio²
Bernardo Friedrich Theodor Rudorff²

^{1,2} Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{salgado, formag, bernardo}@dsr.inpe.br

Abstract. This paper aims to compare different methods to generate digital elevation models (DEM) of a catchment area, from digitized cartographic data. The selected study area was the Rocinha microbasin, located at south of Taubaté city, São Paulo state, Brazil. Eight different methods of interpolation were compared both by correlation analysis with the original data and by techniques of visual analysis. Correlation analysis allowed estimating the proportion of changes in the original elevation values caused by different interpolation methods, and the highest ratio found was 0.09% from the Kriging method. Despite the small proportions of changes in altitude values in cells intercepted by altimetric data, the cells that were not intercepted (located in the spaces between contour lines) showed considerable differences between the interpolation methods. The visual analysis of images generated using shaded relief, slope variation and bipolar differentiation technique allowed us to distinguish some artifacts produced by the different interpolation methods. We observed that the prevalence of artifacts occurs mainly in the plain areas, due to lower density of elevation data used in the interpolation process. We conclude that the selection of the interpolation method should consider the final application of DEM. Conventional methods of interpolation can disadvantage hydrological studies or applications that aim to calculate topographic variables from the DEM.

Palavras-chave: interpolation algorithms, geoprocessing, geomorphology, algoritmos de interpolação, geoprocessamento, geomorfologia.

1. Introdução

Desde que foram apresentados por Miller e Laflamme (1958), os modelos digitais de elevação (MDE) vêm sendo utilizados para a representação computacional das formas do relevo da superfície terrestre. Os MDE armazenam os dados altimétricos em uma estrutura matricial constituída por uma grade de valores organizados em linhas e colunas regularmente espaçadas. Deste modo a intersecção de uma linha com uma coluna distingue uma célula do MDE, na qual está armazenado um valor de altitude. De acordo com Desmet e Govers (1996), esta estrutura matricial favorece a manipulação dos dados topográficos auxiliando no cálculo de variáveis topográficas, com base na relação de vizinhança das células (*i.e.* declividade, aspecto, curvatura, etc.).

Segundo Valeriano (2002) os MDE permitem calcular uma série de variáveis topográficas frequentemente solicitadas nas análises ambientais e nos empreendimentos de engenharia. Os MDE são comumente utilizados como fonte de dados topográficos na análise de bacias hidrográficas. Segundo Moore (1991), a topografia de uma bacia hidrográfica tem um grande impacto sobre os processos hidrológicos, geomorfológicos e biológicos ativos na paisagem. A distribuição espacial das variáveis topográficas pode muitas vezes ser usada como uma medida indireta da variabilidade espacial destes processos e permitir que estes sejam modelados. Deste modo, a utilização do MDE se faz necessária na grande maioria das análises realizadas por sistemas de informações geográficas (SIG).

Atualmente, existem opções para extrair MDE de boa qualidade a partir de dados obtidos por sensoriamento remoto, conforme apresentado por Toutin e Gray (2000). Os dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) fornecidos pela *United States Geological Survey* (USGS) a partir do ano 2000 e os dados ASTER GDEM (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model*) fornecidos pelo *Earth*

Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC) a partir do ano 2009, ambos disponibilizados gratuitamente na internet, são opções de MDE derivados de dados obtidos por sensoriamento remoto. Entretanto, segundo Valeriano (2002), embora existam MDE de várias origens, os dados cartográficos constituem uma importante fonte de dados para sua construção.

Essencialmente, a geração do MDE a partir de dados cartográficos consiste na digitalização dos dados topográficos (isolinhas e pontos cotados) e sua posterior interpolação, de modo que as elevações são estimadas ponto a ponto de uma grade regular para seu armazenamento sistemático. No entanto, diversos autores alertam sobre os possíveis erros ocasionados no processo de interpolação que podem comprometer a qualidade do MDE gerado. Segundo Desmet (1997) isto enfatiza o cuidado com que o método de interpolação deve ser escolhido e os resultados das análises interpretados. Wise (2000) afirma que a utilização do MDE deve ser precedida por uma análise da qualidade deste, antes de tentar usá-lo e que os resultados devem ser verificados para garantir que eles sejam razoáveis.

Desta forma, o presente artigo tem por objetivo comparar diferentes métodos para geração de MDE de bacias hidrográficas a partir de dados cartográficos. Buscou-se analisar e comparar o método proposto por Hutchinson (1989) projetado para criar MDE hidrológicamente corrigidos, o método descrito por Valeriano (2002) para elaborar MDE utilizando geoestatística (Krigagem), o método INTERCON disponível no SIG Idrisi (Eastman, 2006), os métodos convencionais de interpolação (média simples e média ponderada) e métodos que utilizam duas etapas de interpolação, gerando inicialmente uma grade irregular triangular (*triangular irregular network – TIN*) e em seguida a grade regular do MDE.

2. Metodologia de Trabalho

As ferramentas utilizadas e os procedimentos realizados para a geração dos MDE da bacia hidrográfica selecionada, com base nos dados cartográficos digitalizados, podem ser representados pelo fluxograma ilustrado na Figura 1.

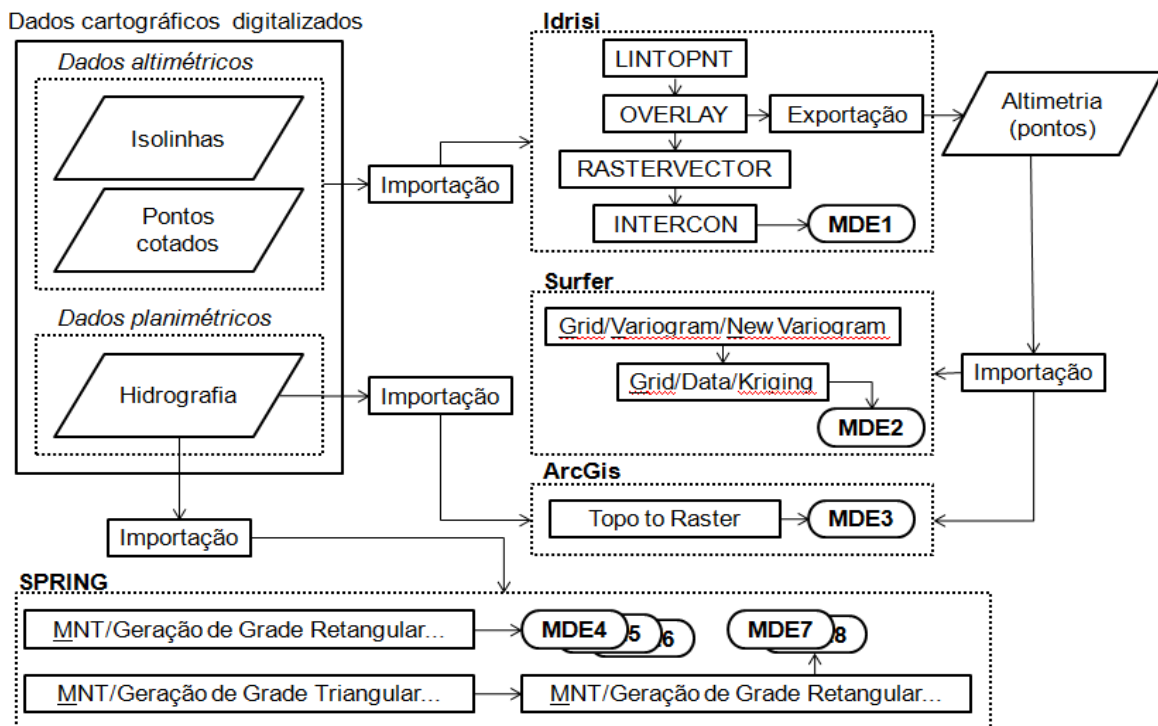


Figura 1. Fluxograma dos procedimentos realizados e ferramentas utilizadas para a geração dos MDE a partir dos dados cartográficos digitalizados.

Os dados cartográficos utilizados correspondem às cartas do Instituto Geográfico e Cartográfico (IGC) com escala 1:10.000, identificadas pelos números 082-123, 082-124, 082-125, 083-123, 083-124, 083-125, 084-123, 084-124 e 084-125, de acordo com o mapa índice dos projetos de mapeamento apresentado por IGC (1998). Os dados cartográficos foram empregados na geração dos MDE da microbacia da Rocinha, com área aproximada de 68km² localizada ao sul do município de Taubaté-SP, conforme ilustrado na Figura 2.

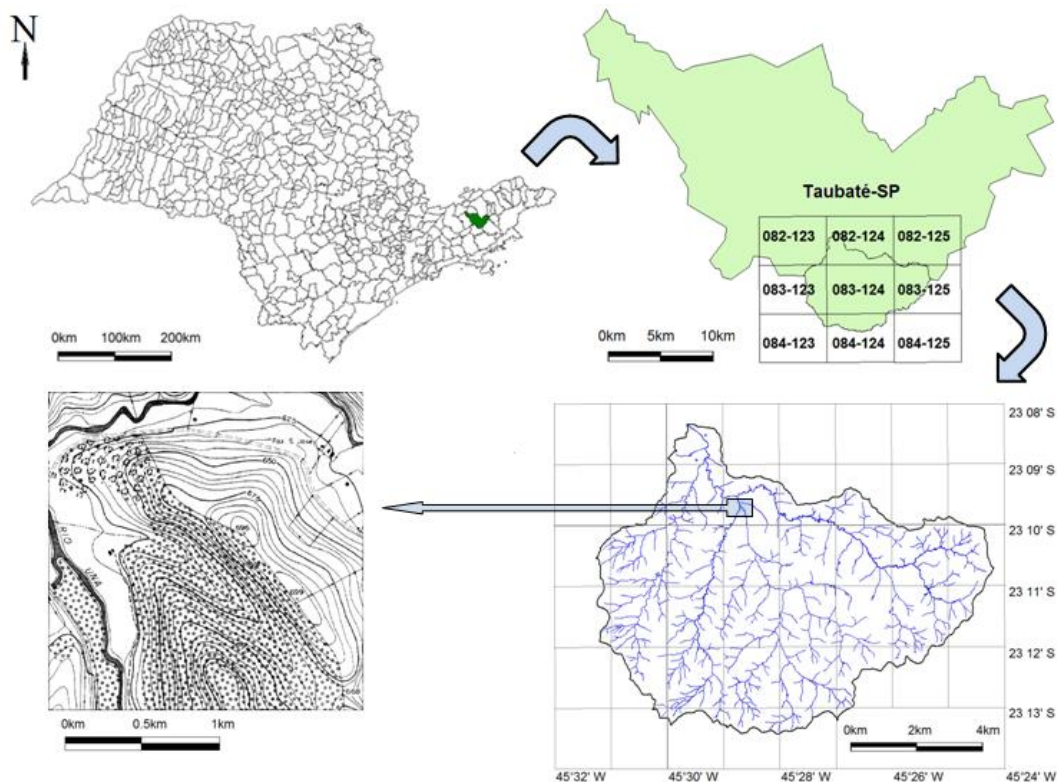
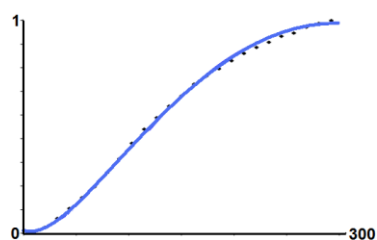


Figura 2. Localização da área de estudo ao sul do município de Taubaté-SP, cobertura dos dados cartográficos IGC, limite e hidrografia da microbacia da Rocinha e representação das cartas IGC de escala 1:10.000.

Os dados cartográficos de altimetria foram importados para os SIG *Idrisi*. Utilizou-se a ferramenta *LINTOPNT* para converter as isolinhas em pontos e por meio da ferramenta *OVERLAY* os pontos cotados foram adicionados aos pontos originados a partir das isolinhas, gerando assim o arquivo contendo toda informação altimétrica representada por pontos. A ferramenta *RASTERVECTOR* foi utilizada para converter os dados altimétricos vetoriais (pontos) para o formato matricial (*raster*) e em seguida utilizou-se a ferramenta *INTERCON* para gerar o MDE1.

O arquivo contendo a altimetria (em pontos) foi importado pelos SIG *Surfer* (Golden Softwares, 2009), utilizado para realizar as etapas de análise geoestatística, modelagem do semivariograma (ver Figura 3) e interpolação (Krigagem Ordinária) para a geração do MDE2.



Semivariograma padronizado
 Modelo: Gaussiano
 Omnidirecional
 Alcance: 150
 Escala de semivariância: 0,9
 Efeito pepita: 0,01

Figura 3. Características do semivariograma utilizado para a interpolação do MDE2.

O processo de interpolação baseado no método proposto por Hutchinson (1989) foi realizado no aplicativo *ArcGis* (ESRI, 2008) por meio da ferramenta *Topo to Raster*, para a geração do MDE3, utilizando os dados altimétricos (pontos) e a hidrografia como linha de restrição.

Os métodos convencionais de interpolação e os métodos que utilizam a interpolação TIN foram realizados no aplicativo SPRING (Câmara et al., 1996). Sendo que os MDE4, MDE5 e MDE6 foram gerados utilizando os interpoladores Média Simples, Média Ponderada (*Inverse distance weighting* - IDW) e Média Pond./Cota/Quad., respectivamente. Os MDE7 e MDE8 foram criados utilizando uma etapa prévia de interpolação, gerando uma grade irregular triangular (triangulação *Delaunay*), sendo que o MDE8 utilizou a hidrografia como linha de quebra (linha de restrição para a triangulação). Em seguida os dados no formato TIN foram reinterpolados para o formato de grade regular utilizando o interpolador Linear,

Todos os MDE foram gerados utilizando espaçamento celular de 10m x 10m, respeitando a acuidade visual de 0,2mm para a escala dos dados cartográficos (espaçamento celular mínimo de 2m x 2m para dados cartográficos com escala 1:10.000) conforme Fernandes e Menezes (2005). O sistema de projeção cartográfica Universal Transversa de Mercator (UTM) e o Datum *South America 1969* (SAD69) foram empregados para a construção dos MDE.

Os valores de altitude armazenados pelas células dos MDE foram comparados com os valores das cotas originais dos dados cartográficos, por meio da análise de correlação dos MDE, utilizando um conjunto de 561835 pontos extraídos dos dados altimétricos. A análise visual dos MDE foi realizada utilizando o aplicativo *Global Mapper* (Global Mapper Softwares, 2008), segundo as técnicas descritas por Prodobnikar (2009).

3. Resultados e Discussão

A análise de correlação dos pontos extraídos dos dados altimétricos e os MDE gerados pelos diferentes processos de interpolação, apresentada na Tabela 1, permite verificar a proporção da variabilidade da altitude dos MDE semelhante à variabilidade da altitude dos dados cartográficos originais. Deste modo, é possível estimar a proporção das alterações dos valores de altitude dos MDE causadas pelos diferentes métodos de interpolação.

Tabela 1. Coeficiente de correlação de Pearson e coeficiente de determinação.

	MDE1	MDE2	MDE3	MDE4	MDE5	MDE6	MDE7	MDE8
ρ	1	0,999560	0,999882	0,999616	0,999727	0,999662	0,999705	0,999704
R^2	100%	99,91%	99,98%	99,92%	99,95%	99,93%	99,94%	99,94%

Pode-se observar que o método de interpolação INTERCON foi o único a gerar um MDE com valores de altitude 100% idênticos aos dados cartográficos originais (considerando as células do MDE que são interceptadas pelas isolinhas dos dados cartográficos). Entretanto, todos os MDE apresentaram alta correlação com os dados cartográficos originais, sendo que o MDE2 apresentou a maior diferença (0,09%). Porém, apesar das pequenas proporções das alterações dos valores de altitude apresentadas pelos diferentes métodos de interpolação nas células interceptadas pelos dados altimétricos, as células que não foram interceptadas (localizadas nos espaços entre as isolinhas) apresentaram diferenças consideráveis entre os métodos de interpolação.

A visualização dos perfis verticais, extraídos a partir dos MDE resultantes, permitiu verificar a regularidade das superfícies geradas nas regiões entre as isolinhas. A Figura 4 possibilitou identificar os métodos de interpolação aptos a modelar uma superfície regular nas áreas de interflúvio e de talvegues. Observou-se que os MDE 2, 3 e 5 apresentaram uma superfície regular capaz de modelar a curvatura de topo do morro na região de interflúvio.

Entretanto, apenas os MDE 3 e 8 foram capazes de representar a região de talvege de maneira satisfatória (coincidindo com o leito do curso d'água).

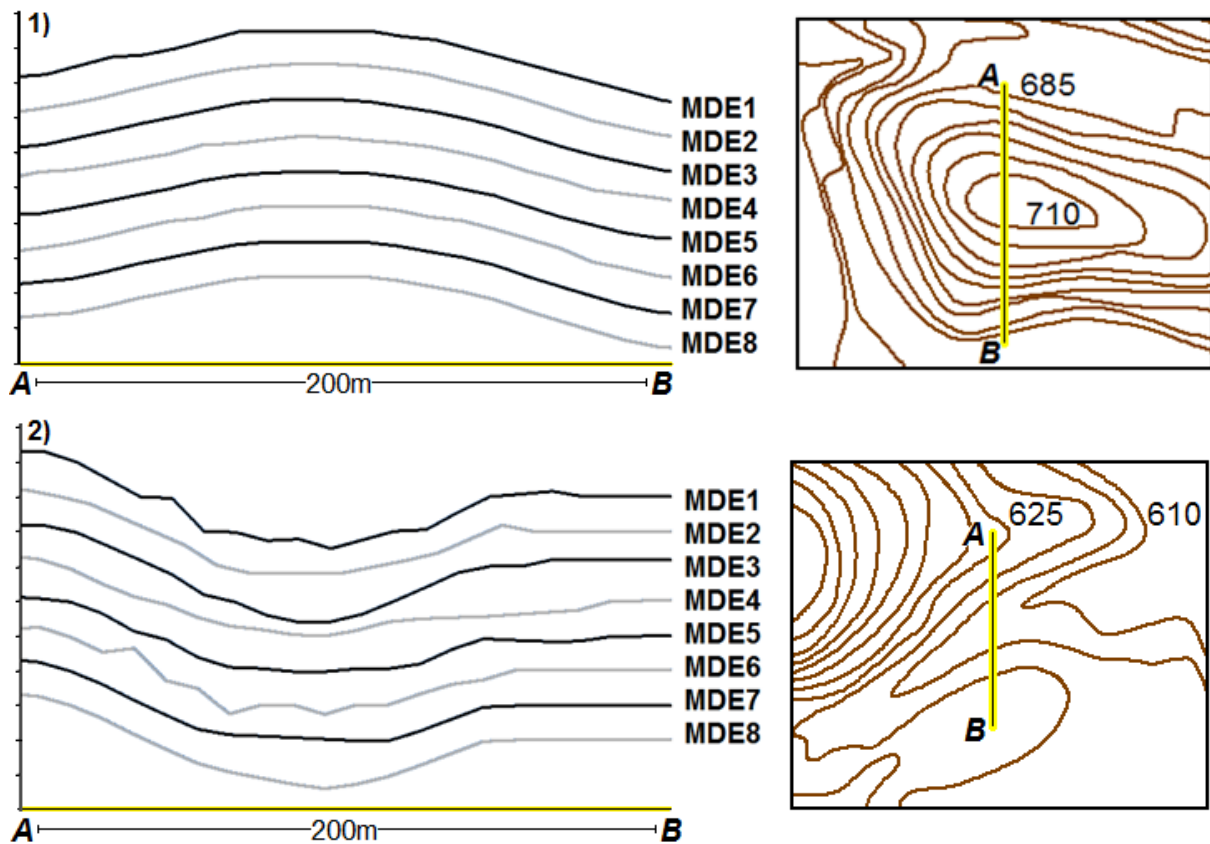


Figura 4. Comparação entre perfis verticais em regiões de interflúvio (1) e de talvege (2).

A análise das imagens geradas a partir dos MDE utilizando o efeito de relevo sombreado permitiu distinguir alguns artefatos (erros) gerados pelos diferentes métodos de interpolação. A Figura 5 ilustra os artefatos característicos dos processos de interpolação utilizados. Foi possível distinguir três tipos principais de artefatos gerados pelos diferentes interpoladores.

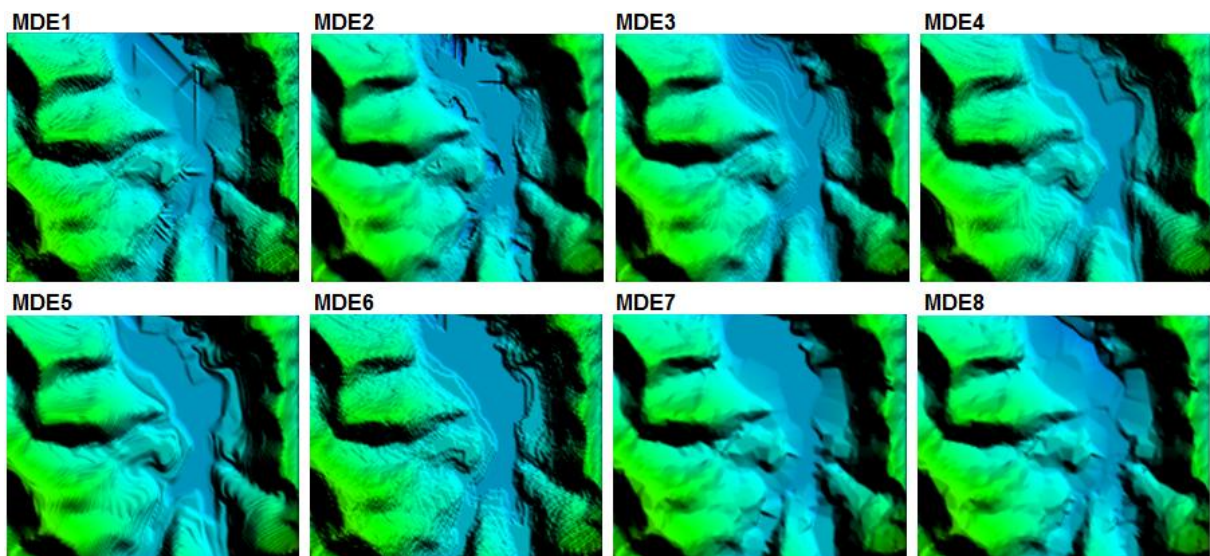


Figura 5. Representação dos MDE utilizando imagens com efeito de relevo sombreado (direção da iluminação: 45° de altitude e 45° de azimuth).

Os MDE 1 e 2 apresentaram artefatos caracterizados por formas retilíneas, os MDE 3, 4, 5 e 6 artefatos caracterizados por formas curvilíneas semelhantes ao formato das isolinhas e os MDE 7 e 8 artefatos caracterizados por arestas resultantes do processo de interpolação da grade irregular triangular. A técnica de diferenciação bipolar, ilustrada na Figura 6, permite visualizar até mesmo pequenos detalhes localizados nos intervalos entre as isolinhas.

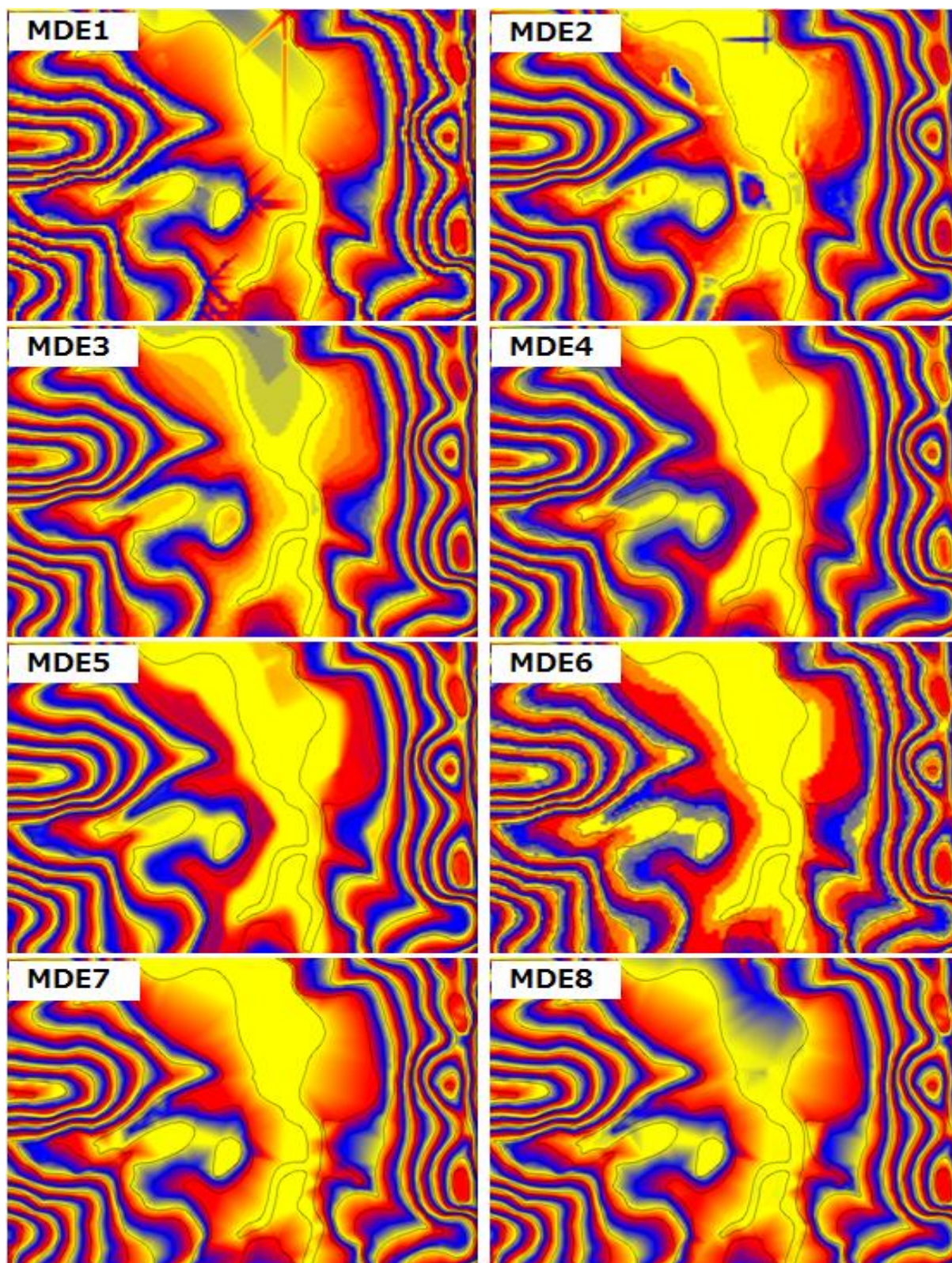


Figura 6. Representação dos MDE utilizando imagem dicromática para diferenciação bipolar.

Algumas pequenas oscilações (possíveis erros) puderam ser devidamente avaliadas por meio da técnica de diferenciação bipolar, de forma independente do ângulo de iluminação e azimute escolhidos para visualização do relevo sombreado. Pode-se verificar que a maior frequência de artefatos ocorre principalmente nas áreas planas, devido à menor densidade de dados altimétricos utilizados no processo de interpolação. Observou-se que o MDE1, apesar de apresentar o maior coeficiente de correlação, também apresentou a maior ocorrência de artefatos indesejados ao MDE.

A visualização da variável declividade, derivada a partir dos MDE interpolados, permitiu avaliar o potencial dos diferentes métodos de interpolação para o cálculo de variáveis topográficas. Analisando a Figura 7 foi possível observar que os MDE 4, 5 e 6 apresentaram faixas de maior declividade nas áreas interceptadas pelas isolinhas dos dados cartográficos. O MDE1 também apresentou faixas de maior declividade, porém de modo descontínuo (devido à ocorrência dos artefatos). Os MDE 2 e 3 apresentam resultados semelhantes nas áreas de alta declividade, porém nas áreas com baixa declividade o MDE3 apresentou menor ocorrência de artefatos. A declividade derivada a partir dos MDE 7 e 8 caracterizou-se por apresentar faces com valores constantes (devido ao processo de triangulação), entretanto o MDE8 apresentou resultado satisfatório nas regiões de vale.

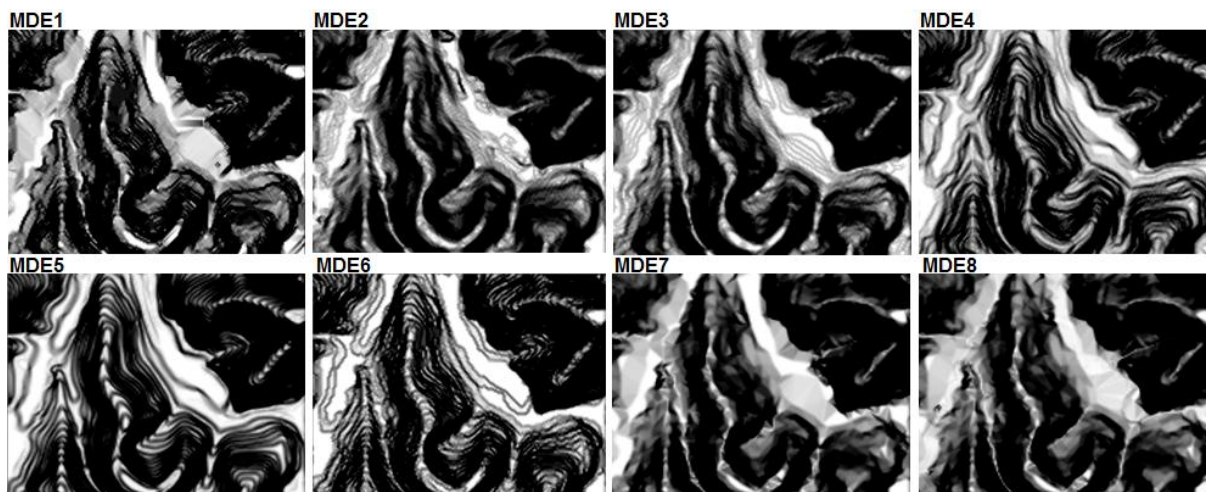


Figura 7. Representação da variável declividade derivada a partir dos diferentes MDE.

A análise visual permitiu distinguir diferenças entre os MDE que não foram observadas nos resultados da análise numérica. O método de interpolação INTERCON, utilizado para gerar o MDE1, apresentou uma série de características desfavoráveis à sua utilização, apesar de conservar 100% os valores de altitude originais dos dados cartográficos. O método de interpolação descrito por Valeriano (2002), utilizado para gerar o MDE2, apresentou bons resultados nas áreas com alta declividade devido à maior densidade de dados cartográficos (pontos) utilizados no processo de interpolação. Entretanto, nas áreas planas (com menor densidade de dados cartográficos) foi observada a presença de artefatos que podem comprometer aplicações hidrológicas.

O método proposto por Hutchinson (1989) apresentou grande potencial para aplicações que necessitem de um MDE hidrológicamente correto. Entretanto, o método utilizado para a geração do MDE8 pode ser uma alternativa para estes tipos de aplicações, em casos de carência das ferramentas necessárias (*topo to raster*).

4. Conclusões

A escolha do método de interpolação deve considerar a aplicação final do MDE. Os métodos convencionais de interpolação podem não favorecer aplicações que visem o cálculo

de variáveis topográficas a partir dos MDE. Os métodos usados para a geração dos MDE 3 e 8 são recomendados para aplicações hidrológicas. O método empregado para a geração do MDE2 (Krigagem) apresentou bons resultados nas áreas declivosas, porém nas áreas planas apresentou uma grande quantidade de artefatos.

Referências Bibliográficas

Câmara, G.; Souza, R. C. M.; Freitas, U. M.; Garrido, J. SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. **Computer and Graphics**, v. 20, n. 3, p. 395-403, 1996.

Desmet, P.J.J.; Govers, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 51, p. 427-433, 1996.

Desmet, P. J. J. Effects of interpolation errors on the analysis of DEMs. **Earth Surface Processes And Landforms**, v. 22, p. 563-580, 1997.

Eastman, J. R. **IDRISI Andes**: guide to GIS and Image processing. Versão 15 (Andes Edition). Worcester: Clark University, 2006. 328 p.

Earth Remote Sensing Data Analysis Center (ERSDAC). **ASTER GDEM data**. Disponível em: <<http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp/search.jsp>>. Acesso em: 10 set. 2010.

Environmental Systems Research Institute (ESRI). **ArcGis Desktop**. Versão 9.3. Redlands: ESRI Inc., 2008.

Fernandes, M. C.; Menezes, P. M. L. Comparação entre métodos para geração de MDE para a obtenção de observações em superfície real no maciço da Tijuca-RJ. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 57, v. 2, p. 154-161, 2005.

Global Mapper Software LLC. **Global Mapper**. Versão 9.03. Parker: Global Mapper Software LLC, 2008.

Golden Software, Inc. **Surface Mapping System - Surfer**. Versão 9.1.352, 2009.

Hutchinson, M. F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hydrology**, v. 106, p. 211-232, 1989.

Instituto Geográfico Cartográfico (IGC). **Mapa índice dos projetos de mapeamento 1:10.000**. Divisão Municipal do Estado de São Paulo. São Paulo, 1998. Escala 1:1.000.000.

Miller, C. L.; Laflamme, R. A. The digital terrain model: theory and application, **Photogrammetric Engineering**, v.24, n.3, p.433, 1958.

Moore, I. D.; Grayson, R. B.; Ladson, A. R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological Processes**, v.5, p.3-30, 1991.

Podobnikar, T. Methods for visual quality assessment of a digital terrain model. **Surveys and Perspectives integrating Environment and Society**, v. 2, n. 2, p. 19, 2009.

Toutin, T.; Gray, A. L. State of the art of extraction of elevation data using satellite SAR data. **Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 55, n. 1, p. 13-33, 2000.

United States Geological Survey (USGS). **SRTM data**. Disponível em: <http://dds.cr.usgs.gov/srtm/version2_1/SRTM3>. Acesso em: 10 set. 2010.

Wise, S. M. Assessing the quality for hydrological applications of digital elevation models derived from contours. **Hydrological Processes**, v.14, p.1909-1929, 2000.

Valeriano, M. M. **Modelos digitais de elevação de microbacias elaborados com krigagem**. São José dos Campos: INPE, 2002. 54 p. (INPE-9364-RPQ/736).