

Revista Brasileira de Cartografia (2014) N<sup>o</sup> 66/6: 1315-1329  
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto  
ISSN: 1808-0936

## ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS INTERPOLADORES DE MODELOS DE SUPERFÍCIES

*Comparative Analysis of Interpolation Methods for Surface Models*

**Giovanni Giacomini, Matheus Bueno de Carvalho, Afonso de Paula dos Santos, Nilcilene das Graças Medeiros & Antônio Santana Ferraz**

**Universidade Federal de Viçosa – UFV**

**Departamento de Engenharia Civil -Setor de Engenharia de Agrimensura e Cartográfica**

Av. P. H. Rolfs s/n - Viçosa, MG – CEP: 36570-000

giovanni.giacomini@ufv.br; bueno.carvalho@gmail.com

afonso.santos@ufv.br; nilcilene.medeiros@ufv.br

ferraz@ufv.br

*Recebido em 05 de Julho, 2014/ Aceito em 27 de Julho, 2014*

*Received on July 05, 2014/ Accepted on July 27, 2014*

### RESUMO

O conhecimento da superfície terrestre sempre teve grande importância para a humanidade e sua representação se dá de várias formas. Para isso é necessária uma quantidade mínima de informações amostradas, e então se torna possível criar um modelo que descreva essa superfície. Este trabalho avaliou interpoladores utilizados para representação de relevo, como Inverso Ponderado da Distância, Krigagem, Topo to Raster e Spline, por meio da qualidade posicional altimétrica de cada produto por eles gerado. Assim determinou-se uma escala e resolução espacial para a utilização do ASTER GDEM, baseado no Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC). Tais produtos foram comparados a dados LiDAR, referentes à mesma área de estudo, que possui um vale e duas cadeias de montanha, tendo uma amplitude de altitude de 730 metros, localizada em Santa Bárbara, região metropolitana de Belo Horizonte, MG. A metodologia deste trabalho foi desenvolvida de forma a automatizar o processo de avaliação do PEC altimétrico das interpolações, que tiveram as resoluções espaciais de 3; 7,5; 10; 15; 20; 22,5; 40 e; 80 metros, aplicadas à todos os interpoladores e avaliadas através de duas amostras, contendo 20 e 168 pontos de checagem. Adicionalmente, avaliou-se as resoluções espaciais de 3 e 7,5 metros através de uma amostra contendo 500.000 pontos de checagem. Os resultados obtidos indicam que a utilização do interpolador Topo to Raster, com resolução espacial de 15 metros apresentou melhores resultados e que o número de amostras para a classificação dos produtos nem sempre tem um comportamento específico. Sua classificação quanto ao PEC foi Classe C em 1:100.000 e Classe A em 1:250.000. Sendo assim, seu uso é recomendado para uma escala de 1:250.000 para a região estudada.

**Palavras-chave:** Interpoladores, ASTER GDEM 2, MDS, Controle de Qualidade Cartográfica.

### ABSTRACT

Knowing Earth's surface was always very important for humanity and its representation is possible in many ways. In order to do it, a minimum of sampled information is necessary, and then it becomes possible to create a mathematical model that describes this surface. This study evaluated interpolators used to represent elevation models, as Inverse Distance Weighting, Kriging, Topo to Raster and Spline, analyzing the quality of the positional elevation of each product generated by them. Thus, it was defined a scale and spatial resolution to ASTER GDEM 2, based on Cartographic

Accuracy Standards (PEC). These products were compared with LiDAR data from the same study area, which has a valley and two chains of mountains, having an amplitude of altitude of 730 meters, located at Santa Barbara city, metropolitan region of Belo Horizonte, MG. The methodology applied to this work was developed aiming to automate the altimetric PEC evaluation process of the interpolations, which had geometric resolutions of 3; 7,5; 10; 15; 20; 22,5; 40 and; 80 meters, that were applied to all the interpolator and evaluated by two samples of 20 and 168 checking points. In addition, one sample of 500.000 checking points for the resolutions of 3 and 7,5 meters were evaluated. The results showed that Topo to Raster, with spatial resolution of 15 meters, demonstrated the best results and that the number of checking points used in the classification of the products does not always show a specific tendency. Its PEC classification was Class C for the scale of 1:100.000 and Class A for the scale of 1:250.000. Thus, its use is recommended for the scale of 1:250.000 for the studied area.

**Keywords:** Interpolators, ASTER GDEM 2, DEM, Cartographic Quality Control.

## 1. INTRODUÇÃO

Desde os tempos primórdios, os homens que habitavam esta época já descreviam o meio em que viviam através de desenhos em paredes de cavernas, placas de argila, entre outras maneiras.

Hoje em dia não é diferente, apenas a maneira como essa representação é feita mudou. Segundo Oliveira (2011), os documentos cartográficos são largamente utilizados em diversas ações sobre o espaço geográfico, em diversas áreas de atuação, como por exemplo a gestão ambiental, exploração de recursos naturais, prestação de serviços de infraestrutura, entre outros.

O conhecimento do relevo da superfície terrestre também é de grande importância para muitos segmentos da sociedade, afinal, é onde a grande maioria das pessoas vive, trabalha e leva suas vidas diárias. O relevo pode ser representado de inúmeras formas, tais como hachuras, cores hipsométricas, perfis topográficos, em matrizes de dados, porém, as mais comuns são as curvas de nível e os pontos cotados (LILLESAND *et al.*, 2007).

No Brasil, esta representação do relevo é feita de forma sistemática através do mapeamento sistemático brasileiro, servindo de suporte ao mapeamento temático, ferroviário, aeronáutico, rodoviário, autoproteção do país, entre outras finalidades (IBGE, 2013). Segundo Rodrigues *et al.* (2010), atualmente, grandes áreas do território brasileiro ainda apresentam inexistência de informações planimétricas e altimétricas de confiabilidade, principalmente nas regiões Norte e Nordeste.

Uma das partes mais onerosas na representação do relevo da superfície terrestre é a

coleta de dados que a representem. Com o intuito de facilitar esta representação, desenvolveu-se ao longo do tempo a técnica de amostragem e interpolação de dados.

Recorre-se à amostragem de pontos coletados sobre a superfície topográfica para representá-la segundo um modelo matemático previamente definido. A interpolação na modelagem do relevo é usada para determinar o valor da altitude de um ponto não-amostrado, através das altitudes conhecidas dos pontos amostrados vizinhos (LILLESAND *et al.*, 2007).

A técnica de interpolação tem a grande vantagem de facilitar a distribuição espacial de dados pontuais, estimando os dados recorrentes entre as amostras. Dependendo do algoritmo que é escolhido para a aplicação da interpolação, distintos resultados podem ser apreciados.

Por se tratar de processo oneroso, tanto temporal quanto econômico, a representação do relevo deve ser feita de modo que vise a minimização de tais custos. Portanto, esta representação não se mostra como uma tarefa simples e o uso de interpoladores nesta atividade tem por finalidade reduzir o esforço da coleta de dados, prezando sempre pela qualidade posicional do produto gerado. Além disso, com a interpolação de dados, procura-se maximizar a extração de informações sobre o terreno, as quais podem ser usadas de diversas maneiras, inclusive no mapeamento sistemático brasileiro.

Os Modelos Digitais de Elevação (MDE) e os Modelos Digitais de Superfície (MDS), como qualquer outro produto cartográfico, devem ser classificados segundo sua acurácia posicional, a qual pode ser decomposta em suas componentes planimétrica e altimétrica. Esta classificação ocorre, no Brasil, de acordo com o Decreto Lei no 89.817, de 1984 e pela

NBR 13.133, que dispõem sobre a avaliação da qualidade posicional em produtos cartográficos (SANTOS, 2010).

Esta classificação do produto cartográfico é feita através de uma amostra contendo vários pontos de checagem. Em normas vigentes brasileiras, não existe uma definição clara sobre o número de pontos de checagem em uma amostra que devem ser utilizados para avaliar o produto cartográfico, o que dificulta a padronização sobre tal atividade.

Apesar dos interpoladores serem um constante alvo de estudo, a avaliação da acurácia posicional dos produtos cartográficos gerados pelos interpoladores ainda é pouco levada em consideração, tampouco a escala ótima destas interpolações.

Diante do exposto, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar alguns interpoladores utilizados para representação de relevo. Especificamente, foi objeto de estudo avaliar os interpoladores Inverso da Distância, Krigagem, Topo to Raster e Spline para as resoluções de 3; 7,5; 10; 15; 20; 22,5; 40 e 80 metros, utilizando dados do MDS ASTER GDEM 2. Para analisar o desempenho do interpolador e da resolução espacial utilizada, avaliou-se a qualidade posicional altimétrica de cada produto gerado, baseando-se na classificação da acurácia posicional altimétrica pelo Decreto-lei nº 89.817/1984, para as escalas de 1:100.000 e 1:250.000.

## **2.MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIES**

Neste trabalho adota-se a definição de Li *et al.* (2004), na qual o conceito de Modelo Digital do Terreno (MDT) é definido como um conjunto ordenado de pontos de dados amostrados que representam a distribuição espacial de vários tipos de informação no terreno. Portanto um MDT pode representar uma superfície com atributos topográficos, meteorológicos, hidrológicos, entre outros. Se o atributo de representação corresponder à altitude do terreno o modelo é chamado de MDE ou MDS.

A denominação MDE é utilizada para modelos que representam a superfície do terreno imersa ou emersa (sem cobertura vegetal ou edificações), enquanto que MDS é utilizado para descrever as superfícies que consideram as elevações do terreno e de qualquer objeto acima

dele, como edificações e cobertura vegetal (LI *et al.*, 2004).

De acordo com Li *et al.* (2004), no processo de construção de um MDS uma de suas etapas é a reconstrução da superfície do terreno, a partir da aplicação de métodos interpoladores, sendo uma aproximação, segundo a perspectiva matemática, e uma questão de estimativa, quando se trata de estatística.

Muito já se estudou sobre interpoladores e há vários exemplos de estudos feitos para diversas aplicações. Botelho *et al.* (2004), compararam os interpoladores Inverso Ponderado da Distância (IDW) e o Vizinho Mais Próximo no cálculo do volume de uma edificação a partir de dados LiDAR, apresentando que o interpolador Vizinho Mais Próximo se mostrou eficiente e produziu um produto mais acurado que o outro interpolador testado. Mazzini e Schettini (2009) avaliaram os interpoladores IDW, Krigagem, Spline, e outros oito interpoladores aplicados a dados hidrográficos costeiros, não chegando a uma conclusão efetiva sobre qual método interpolador é o mais efetivo, pois, segundo os autores, não há testes estatísticos suficientes para comprovar a eficiência da interpolação.

Além das pesquisas, dados altimétricos gerados a partir da interpolação de dados pré-existentes, como no caso dos produtos Topodata realizados pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), também vêm sendo disponibilizados aos usuários.

O que segue faltando, na maioria das práticas, é a avaliação da acurácia posicional de cada produto gerado pelos interpoladores. Visto que a última etapa do processo de modelagem digital do terreno é seu pós-processamento e avaliação de sua qualidade final (Li *et al.*, 2004). Outro fato é a falta de estabelecimento na determinação da escala para o qual estes dados podem ser considerados acurados.

### **2.1 ASTER – *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer***

Os produtos ASTER são derivados de um sistema imageador a bordo do satélite TERRA. Estes produtos são resultado de uma parceria entre a NASA (*National Aeronautics and Space Administration*), o METI (Ministério de Economia, Troca e Indústria do Japão) e o Sistema Espacial Japonês (*J Space Systems*).

Imagens do sensor ASTER podem ser utilizadas para gerar mapas detalhados de temperatura, reflectância terrestre e de altitude, gerando produtos em 14 diferentes bandas do espectro eletromagnético (NASA, 2013).

Os sensores geradores dos produtos ASTER são três: o sensor que atua na região do visível e do infravermelho próximo do espectro eletromagnético (VNIR), o sensor que atua na região do infravermelho de ondas curtas (SWIR) e, o sensor que atua no infravermelho termal (TIR) (NASA, 2013).

Para se conseguir gerar estereoscopia nas imagens geradas pelo sistema, o sensor VNIR adquire, além da visada no nadir, uma imagem com visada “para trás”, imageando o mesmo local por um ponto de vista diferente, o que é a base da estereoscopia (LILLESAND *et al.*, 2007). Os MDSs podem, então, ser gerados a partir destas imagens.

A Versão 1 desse sistema foi lançada em 29 de junho de 2009, e foi usada por um grande número de usuários. A Versão 2 foi lançada em 17 de outubro de 2011, e neste processo foi empregado um algoritmo para melhoria da resolução do MDS, da acurácia da altitude, redução de descontinuidade dos dados, correção de anomalias e, além disso, foram reprocessadas 1,5 milhões de cenas e adicionadas outras 250.000 cenas adquiridas após o lançamento da Versão 1.

O MDS é disponibilizado gratuitamente, referenciado ao *World Geodetic System 1984* (WGS84) modelo geoidal *Earth Gravitational Model 1996* (EGM96), e resolução espacial nominal de 30 metros.

Rodrigues *et al.* (2010) validaram produtos ASTER GDEM para a região leste do estado do Paraná e chegaram a conclusão que estes produtos são compatíveis com a Classe A da escala 1:100.000.

A equipe de validação do ASTER GDEM (TACHIKAWA *et al.*, 2011) também divulgaram uma avaliação global da segunda versão dos produtos GDEM. Neste estudo, ficou expresso que as elevações estão, em média, dentro de 3 metros de diferença dos dados utilizados como referência para a validação do estudo. Estes autores perceberam que as discrepâncias do MDS ASTER GDEM2 são sensíveis à altura do dossel das árvores. Também foi apresentado que

regiões montanhosas e florestais estão sujeitas a uma maior discrepância, com RMS da ordem de 15 metros. Em áreas com vegetação baixa, foi obtido um RMS da ordem de 6 metros. Por último, foi sugerido que, antes da utilização da cena, sejam feitos estudos de validação e edição da cena caso a caso, antes do uso para aplicações específicas.

## 2.2 Interpoladores

Segundo Li *et al.* (2004), os interpoladores são muito utilizados para espacialização de dados pontuais. Em relação a grandezas espaciais, os interpoladores classificam-se de acordo com:

Modelagem matemática: Determinístico, que utiliza apenas formulações matemáticas para o cálculo dos valores interpolados em função dos pontos vizinhos e; Geoestatístico, que faz uso de formulação matemática e estatística para a predição de valores desconhecidos.

Baseados na abrangência: Pontos, que consideram a alta correlação entre os valores de altitudes dos pontos vizinhos e; em Regiões, que usam todos os pontos de referência conhecidos dentro da área para construir a superfície, sendo subdivididos em locais, que só levam em consideração pontos próximos aos pontos a interpolar e, globais, que predizem cada novo valor a partir de todo o conjunto de valores conhecidos.

Quanto ao ajuste: sendo ajustados, na qual a superfície coincide exatamente com os pontos amostrados ou; aproximados, em que a superfície gerada não coincide necessariamente com os pontos amostrados.

### 2.2.1 Inverse Distance Weighting (IDW)

O interpolador IDW usa uma combinação linear ponderada dos pontos amostrados. O peso de cada ponto é o inverso de uma função da distância. Este é um interpolador local, no qual o raio (distância) de busca dos pontos amostrados e a potência da função são parâmetros essenciais para sua aplicação (MARCUIZZO *et al.*, 2011).

A ideia por trás do interpolador IDW é que pontos próximos tem valores similares enquanto que pontos distantes são independentes. Assim, pontos amostrados mais próximos do ponto a ser interpolado tem uma maior influência do que pontos amostrados distantes (EL-SHEIMY *et al.*, 2005).

### 2.2.2 Krigagem

Segundo Vieira (2000), a Krigagem é um método de interpolação geoestatística, que considera a Teoria das Variáveis Regionalizadas, na qual utiliza a dependência espacial entre amostras vizinhas, expressa no semivariograma, para estimar valores em posições não-amostradas.

A variação espacial é quantificada através de um semivariograma, o qual é estimado a partir de um semivariograma amostral. O semivariograma é um gráfico de dispersão da semivariância versus distância dos pontos amostrados, sendo que a semivariância é uma medida de dispersão, a metade da variância. (MARCUSO *et al.*, 2011).

A diferença principal deste interpolador para os outros testados é a predição estatística antes da interpolação.

### 2.2.3 Topo to Raster

O interpolador *Topo to Raster* foi recentemente desenvolvido por Hutchinson, na Austrália, e é baseado no algoritmo ANUDEM (*Australian National University's Digital Elevation Model*), e pode ser usado para construir MDEs baseado nos seguintes dados de entrada: curvas de nível, pontos cotados e linhas de hidrografia, para que o modelo resultante preserve a forma e também a estrutura de drenagem (Hutchinson *et al.*, 2009). Este interpolador é uma mistura entre as estratégias local e global.

### 2.2.4 Spline

O método *Spline* é um método de interpolação que estima valores utilizando uma função matemática que minimiza a curvatura da superfície, resultando em uma superfície suave que passa exatamente pelos pontos amostrados (MARCUSO *et al.*, 2011).

## 2.3 Acurácia Posicional

Segundo a Organização Internacional de Padrões (ISO), pela sua norma 19.113 de 2002, o controle de qualidade em dados espaciais considera cinco componentes básicos: Acurácia Posicional; Acurácia Temática; Completude; Consistência Lógica e; Temporalidade. Destes componentes, o mais utilizado em controle de qualidade é a acurácia posicional, sendo descrita como quão próximo a posição de um

dado espacial está em relação à sua realidade no terreno (ISO, 2002).

Segundo Santos (2010), a acurácia posicional vertical de um produto cartográfico é realizada comparando estatisticamente o posicionamento vertical deste dado em relação à posição obtida de um produto de referência ou método mais acurado que o original. A medida de análise da acurácia posicional vertical é a discrepância entre a coordenada do produto em teste ( $Z_T$ ) e a coordenada de referência ( $Z_R$ ), conforme Equação 1.

$$d_z = Z_T - Z_R \quad (1)$$

Diversos países e organizações tem suas próprias normatizações contendo tolerâncias para que um produto cartográfico seja considerado acurado posicionalmente.

No Brasil, o padrão de acurácia posicional é estabelecido pelo Decreto-lei nº 89.817 de 1984. Neste padrão, a tolerância é definida pelo Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), que é um indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade. Essa probabilidade corresponde a 1,6449 vezes o Erro-Padrão (EP) (BRASIL, 1984). Segundo Santos (2010), na avaliação da acurácia posicional pelo padrão brasileiro, duas situações devem ser analisadas:

- 90% dos pontos testados devem apresentar valores de discrepâncias posicionais menores ou iguais ao valor do PEC para a classe e escala testada, e;
- O RMS (*Root Mean Square* - Valor Médio Quadrático) da amostra de discrepância posicional deve apresentar valor menor ou igual ao valor do EP da norma para a classe e escala testada;

A partir desta análise, se as duas condições forem atendidas, o produto cartográfico é classificado em classe A, B ou C.

A Tabela 1 apresenta os respectivos valores da tolerância do PEC altimétrico e do EP calculados para cada escala a ser analisada, que foram calculados de acordo com as especificações contidas no Decreto-lei 89.817/84.

## 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar o exposto no objetivo deste trabalho, foi priorizada a escolha dos materiais disponíveis, principalmente os dados LiDAR utilizados como referência para a avaliação

Tabela 1: Valores do PEC altimétrico e EP para as escalas de 1:100.000 e 1:250.000 de acordo com o Decreto-Lei 87.817/84

Escala	1:100.000	1:250.000
Equidistância Vertical Curvas (m)	50	100
Tolerância (PEC)	(m)	(m)
Classe A	27,47	54,83
Classe B	32,90	65,80
Classe C	41,12	82,25
EP	(m)	(m)
Classe A	16,67	33,33
Classe B	20,00	40,00
Classe C	25,00	50,00

dos interpoladores. Os dados LiDAR foram disponibilizados pela empresa Vale junto ao Laboratório de Geoprocessamento, do Departamento de Solos da Universidade Federal de Viçosa e, posteriormente, disponibilizados para a realização deste trabalho.

Além da disponibilidade dos dados de referência, outro fator que foi levado em consideração foi a variabilidade de altitude da área de estudo, fato importante para avaliar diferentes interpoladores na representação de um terreno.

### 3.1 Área de estudo

A área em estudo foi um quadrado de dimensões de 9,5 km de lado, localizado entre os municípios de Santa Bárbara e Barão de Cocais, ambos situados na Região Metropolitana de Belo Horizonte – MG.

A altitude mínima do local é de aproximadamente 750 metros em relação ao nível médio dos mares, enquanto que a altitude máxima é de 1.480 metros. A região caracteriza-se por possuir um vale e duas cadeias de montanhas, tendo sido seu relevo considerado como forte ondulado.

A Figura 1 mostra a localização da área de estudo no Estado de Minas Gerais e uma parcela da mesma é mostrada em detalhe.

### 3.2 Materiais Utilizados

Os materiais utilizados para o desenvolvimento deste trabalho foram:

- Dado teste: MDS ASTER GDEM 2;

- Dado de referência: Dados LiDAR;
- Software ArcGIS 10.1;
- Microsoft Excel 2010;
- MAPGEO 2010;
- *Software EGM96 Undulation Calculation.*

### 3.3 Metodologia

O pré-processamento do MDS ASTER GDEM2 foi feito para se obter uma comparação efetiva entre os dados de referência e de teste. Assim, os sistemas de coordenadas e de projeção foram uniformizados. O MDS ASTER GDEM2 teve seu sistema de coordenadas alterado do WGS84 para o *South American Datum 1969* (SAD69) com projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), zona 23S, já que o dado de referência (dados LiDAR) foi disponibilizado neste sistema de coordenadas. O passo seguinte foi a extração destes dados para trabalhar somente na área de estudo, com uma pequena área excedente, para evitar o efeito de borda. Em seguida, o ASTER GDEM2, em formato matricial, foi convertido para um formato vetorial, em forma de pontos.

Os interpoladores utilizados neste trabalho fazem parte do pacote de interpoladores implementados no *software* ArcGIS 10.1, dos quais, foram escolhidos: IDW, Krigagem, *Topo to Raster* e *Spline*.

Na execução dos interpoladores foram utilizados os seguintes parâmetros:

- IDW: Potência 2, e; Raio de busca de 12 pontos;
- Krigagem: Krigagem ordinária; Semivariograma esférico, e; Raio de busca de 12 pontos;
- *Topo to Raster*: 20 células marginais; Drenagem forçada; Pontos como dados primários de entrada; 20 como o número máximo de iterações; 1 como sendo o fator de discretização de erro; 0 como desvio padrão vertical; 2,5 como o valor da tolerância 1, e; 100 como o valor da tolerância 2;
- *Spline*: Malha regular; Peso 0,1, e; 12 como o número de pontos amostrados.

O dado de referência merece atenção especial quanto à sua geração. Como o produto de um dado LiDAR é uma nuvem de pontos, é aconselhável transformá-lo, originalmente

de formato vetorial para um dado matricial, principalmente para diminuir o tamanho do arquivo. Neste trabalho, esta transformação foi necessária para que a extração dos dados LiDAR fosse feita de maneira uniforme com as interpolações realizadas nos dados de teste.

Para realizar esta transformação, foi utilizado o *software* ArcGIS 10.1, no qual é possível tratar dados brutos LiDAR, o qual contém a nuvem de pontos. Para a transformação é necessário definir um tamanho de célula e uma maneira de representar os vários pontos contidos na mesma, sendo feita, para este caso, de 3 maneiras diferentes. A primeira delas foi utilizando o valor máximo de altitude contida na célula, a segunda pelo valor mínimo de altitude e a última pela média aritmética de todos os pontos contidos no interior da célula. Os tamanhos de célula escolhidos foram os mesmos dos produtos das interpolações dos dados ASTER GDEM2 (3; 7,5; 10; 15; 20; 22,5; 40 e 80 metros), a fim de se obter uma sobreposição dos dados de teste e de referência.

De posse dos modelos obtidos da interpolação do ASTER GDEM2, procedeu-se a avaliação da acurácia posicional vertical utilizando os modelos de referência LiDAR.

Como não existe uma norma brasileira vigente que defina um número de amostras, foram seguidas normas estrangeiras para este fim. A Organização do Tratado do Atlântico Norte (OTAN), através do documento Acordo de Padronização (STANAG) 2215, de outubro de 2001, intitulado Avaliação de Mapas Terrestres, Cartas Digitais Aeronáuticas e Dados Topográficos, define que a amostra deve conter um número mínimo de 167 pontos de checagem. Já o Comitê (Estado-unidense) Federal de Dados Geográficos (*Federal Geographic Data Committee* - FGDC), através do documento Padrões de Acurácia de Dados Geoespaciais, em sua Parte 3 – Padrão Nacional de Acurácia de Dados Espaciais (*National Standard for Spatial Data Accuracy* – NSSDA) define como sendo mínima a quantidade de 20 pontos de checagem por amostra. As amostras foram criadas de forma que o espaçamento entre os pontos de checagem fosse regular, gerando, assim, malhas retangulares, feitas propositalmente para que amostras fossem coletadas em toda a extensão do produto. As Figuras 2 e 3 mostram

a espacialização dos pontos de checagem em cada amostra.

Após a criação dos pontos de checagem, foram extraídos os valores dos dados das interpolações e dos LiDAR e estes tiveram suas tabelas de atributos exportadas para planilhas de cálculos, contendo o identificador de cada ponto e os valores de altitude.

Com o intuito de verificar a influência do número de pontos de checagem na classificação do produto gerado, 500.000 pontos de checagem foram criados aleatoriamente e usados para extrair os dados dos produtos cartográficos em questão, nas resoluções espaciais de 3 e 7,5 metros, a fim de compará-los aos resultados obtidos pelas classificações anteriores, correspondentes a essas resoluções.

Neste ponto é importante explicitar que os dados verticais estão referenciados a diferentes modelos geoidais. Os dados LiDAR estão referenciados ao *datum* vertical de Imbituba-SC, enquanto que os dados ASTER GDEM2 tem seu modelo geoidal referenciado ao EGM96.

Para realizar a uniformização das altitudes, transformando-as em altitudes elipsoidais, as ondulações geoidais das interpolações dos dados das interpolações foram calculadas utilizando o *software* disponibilizado pela NASA em conjunto com a Agência de Inteligência Geoespacial Americana (NGA) para este fim – *EGM96 Undulation Calculation*. Para os dados LiDAR, as ondulações geoidais foram calculadas utilizando o programa MAPGEO 2010. As altitudes elipsoidais de cada ponto de checagem, referenciadas ao *datum* SAD69, foram dadas pela Equação 2

$$h = N + H \quad (2)$$

onde:

- *h*: altitude referenciada ao elipsóide, a qual se deseja obter;
- *N*: ondulação geoidal, calculada nos *softwares* citados anteriormente através da componente posicional de cada ponto de checagem, e;
- *H*: altitude ortométrica, que já é conhecida para cada produto.

O passo seguinte foi a criação de uma planilha de cálculo para avaliar a qualidade posicional de cada produto gerado a partir do Decreto-lei nº 89.817/84. As escalas de 1:100.000 e 1:250.000 foram utilizadas para a

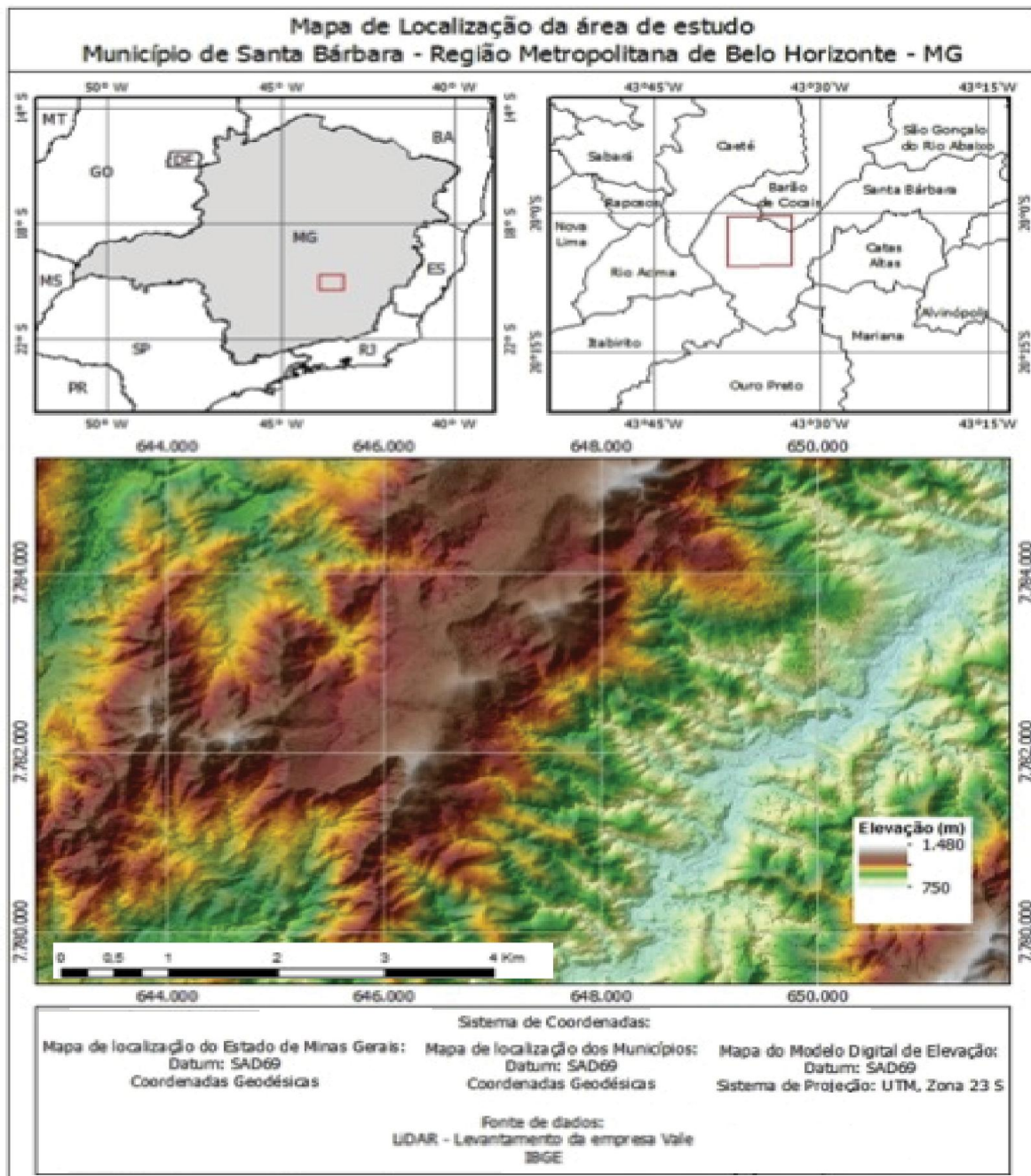


Fig. 1 - Mapa de Localização da área de estudo - Município de Santa Bárbara.

avaliação da acurácia posicional.

De posse destes dados, foram feitas as análises da classe a que cada produto cartográfico se enquadrava. Desta maneira, cada produto cartográfico teve sua classificação altimétrica definida de acordo com o Decreto-lei n° 89.817/1984 e, a partir desta classificação, foi possível comparar os interpoladores entre si e também as resoluções espaciais das interpolações por eles geradas.

#### 4 RESULTADOS

Durante o trabalho, foram analisados 216 produtos cartográficos, dos quais 96 foram

avaliados pelo método de amostragem sugerido pelo NSSDA, 96 pelo método de amostragem sugerido pelo STANAG 2215 e outros 24 gerados através de uma amostragem aleatória de 500.000 pontos de checagem.

A partir da comparação das coordenadas altimétricas extraídas dos dados LiDAR e das coordenadas extraídas das interpolações feitas dos dados do MDS ASTER GDEM2, verificou-se que os produtos gerados, na maioria dos casos, atendem as especificações estabelecidas pelo Decreto-lei n° 89.817 para a Classe A, na equidistância vertical das curvas de nível em 100m (escala de 1:250.000). Para a equidistância



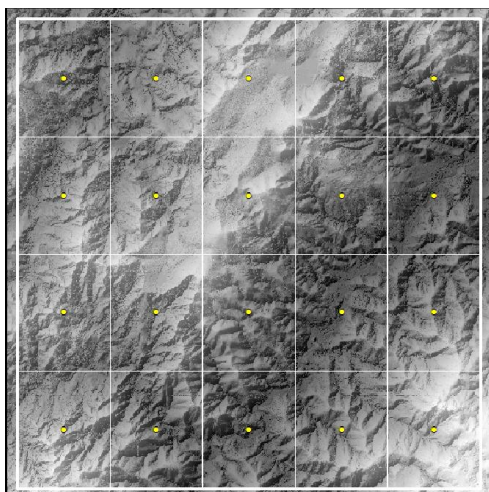


Fig. 2 - Malha definida para coleta de 20 pontos de checagem.

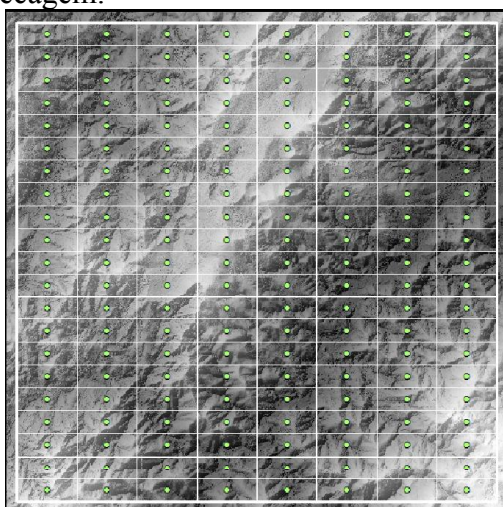


Fig. 3 - Malha definida para coleta de 168 pontos de checagem.

vertical de 50m (escala 1:100.000), os produtos gerados pelas interpolações dos dados do ASTER GDEM2 foram classificados com a Classe C ou Nenhuma.

#### 4.1 Avaliação dos resultados com 20 pontos de checagem – Escala 1:100.000

Percebe-se, quando avaliados os dados gerados a partir dos valores máximos e médios, que apenas os produtos interpolados pelo método da Krigagem, na resolução espacial de 20 metros, foram classificados como Classe C. O restante dos produtos para valores máximos, médios e mínimos não apresentaram classificação para a escala de 1:100.000.

#### 4.2 Avaliação dos resultados com 20 pontos de checagem – Escala 1:250.000

Para a escala de mapeamento de 1:250.000, com equidistância vertical de curvas de nível

em 100 metros, a análise do desempenho dos interpoladores para estes dados foi bastante homogênea.

Para as resoluções espaciais de 3 a 22,5 metros, todos os produtos obtiveram classificação Classe A.

Para a resolução espacial de 40 metros, os interpoladores *Topo to Raster* e *Spline* obtiveram classificação Classe A, enquanto os interpoladores IDW e Krigagem obtiveram Classe B. Para a resolução espacial de 80 metros, os interpoladores *Topo to Raster*, IDW e *Spline* obtiveram classificação Classe B, enquanto que o interpolador Krigagem obteve Classe C.

O RMS de cada interpolação das resoluções espaciais de 3 a 20 metros estiveram abaixo dos 30 metros, sendo que para resolução espacial de 20 metros, o RMS da discrepância foi o menor para a grande maioria dos interpoladores nos 3 tipos de dados de referência (valores mínimo, médio e máximo).

O menor valor da discrepância foi registrado pelo interpolador da Krigagem quando comparado com os dados de referência de valores máximos, para a resolução espacial de 20 metros. A partir desta resolução espacial, o RMS aumentou para aproximadamente 40 metros para a resolução espacial de 80 metros, independente da referência utilizada (valores mínimos, médios e máximos). Tal variação se deve, provavelmente, ao fato de que quanto menor a resolução espacial, menor a dependência espacial entre os pontos de checagem, o que resultaria em tal discrepância.

Os interpoladores *Spline* e *Topo to Raster* obtiveram comportamento bem semelhante em relação ao RMS, com os maiores valores obtidos nas resoluções espaciais de 22,5; 40 e 80 metros.

A diferença entre os resultados destes dois interpoladores e os resultados do interpolador IDW foi a resolução espacial de 40 metros, onde este último apresentou discrepância maior em comparação aos outros dois, independente do método de construção dos dados de referência. O motivo para tal fato é desconhecido e carece de maiores investigações. A Figura 4 apresenta um resumo dos resultados discutidos.

#### 4.3 Avaliação dos resultados com 168 pontos de checagem – Escala 1:100.000

Ao analisar os dados gerados para a escala

de 1:100.000, com equidistância vertical entre curvas de nível de 50 metros, foi possível verificar que, os produtos gerados para as interpolações de 40 e 80 metros não tiveram classificação quanto ao Decreto-lei nº 89.817/84 quando o dado de referência são valores mínimos e máximos. Na validação com o dado de referência sendo o valor médio, a classe dos produtos das interpolações foi a Classe C para todos os interpoladores.

Para a resolução espacial de 22,5 metros, somente três produtos obtiveram classificação Classe C, sendo eles: o produto gerado pelo interpolador *Spline*, na validação com valor máximo e; os produtos gerados pelo interpolador IDW, validado com valores mínimos e máximos. Os outros interpoladores não obtiveram classificação.

O interpolador Krigagem gerou produtos classificados como Classe C para as seguintes resoluções espaciais: 3 e 20 metros para dados de referência com valores máximos; resoluções de 3; 7,5; 15; 40 e 80 metros para dados de referência com valores médios, e; resoluções de 3 e 7,5 metros para dados de referência com valores mínimos. A classificação Nenhuma foi obtida para as resoluções espaciais 7,5; 10 e 15 metros quando comparados com os dados de referência com valores máximos; para as resoluções espaciais 10 e 20 metros quando comparados com os dados de referência com valores médios, e; para as resoluções espaciais 10, 15 e 20 metros quando comparados com os dados de referência com valores mínimos.

O interpolador *Topo to Raster* gerou produtos classificados como Classe C para as resoluções espaciais 3; 7,5; 10; 15 e 20 metros para os 3 tipos de dados de referência. O mesmo resultado foi obtido para o interpolador *Spline*.

Quando comparado com os dados de referência de valores máximos, os produtos gerados pelo interpolador IDW obtiveram classificação Classe C para as resoluções espaciais 3; 7,5; 10; 15 e 20 metros. Quando comparado com os dados de referência de valores médios, os produtos gerados por este interpolador obtiveram classificação Classe C em todas as resoluções espaciais. Já para o mínimo as resoluções espaciais classificadas como Classe C são as mesmas quando comparados aos valores máximos com inclusão de 22,5 metros.

Neste ponto, nota-se que a validação feita

com um maior número de amostras apresentou uma melhor classificação da acurácia posicional, de acordo com o Decreto-lei 89.817, quando comparado aos resultados obtidos com 20 pontos de checagem.

#### **4.4 Avaliação dos resultados com 168 amostras – Escala 1:250.000**

Para a escala de 1:250.000, com 100 metros de equidistância vertical entre as curvas de nível, os resultados apresentaram o mesmo comportamento quanto aos 20 pontos de checagem nas resoluções espaciais de 3 até 22,5 metros, nas avaliações em relação aos valores máximo, médio e mínimo. Na resolução espacial de 40 metros, os produtos interpolados pelo método da Krigagem e pelo método do IDW apresentaram Classe A quando comparados aos valores máximos, médios e mínimos, resultado superior ao alcançado quando comparado com o resultado obtido com 20 pontos de checagem.

Na resolução espacial de 80 metros para valores médios e mínimos, todas as interpolações apresentaram Classe A. Quando comparados aos valores máximos, estes apresentaram Classe A para o interpolador *Topo to Raster* e Classe B para os demais. Estes resultados também se demonstraram superiores aos obtidos com menos pontos de checagem.

O comportamento dos RMS foi bem mais homogêneo em relação a validação com 168 pontos, quando comparado à validação com 20 pontos de checagem. No comparativo com os dados de referência gerados a partir dos valores máximos e mínimos, o RMS, em sua grande maioria, aumentou juntamente com a resolução espacial da interpolação gerada para os interpoladores IDW, *Krigagem* e *Spline*. Os valores dos RMS iniciaram-se próximos a 23 metros e terminaram próximos a 35 metros para os dados de referência gerados a partir dos valores máximos e próximos a 30 metros para os dados de referência gerados a partir dos valores mínimos. O interpolador *Topo to Raster* diferenciou-se dos outros devido a uma breve diminuição do RMS para as resoluções espaciais de 15 e 40 metros em comparação com as resoluções espaciais anteriores a elas, sendo que os melhores resultados se apresentaram para a resolução espacial de 15 metros, metade da resolução original dos dados.

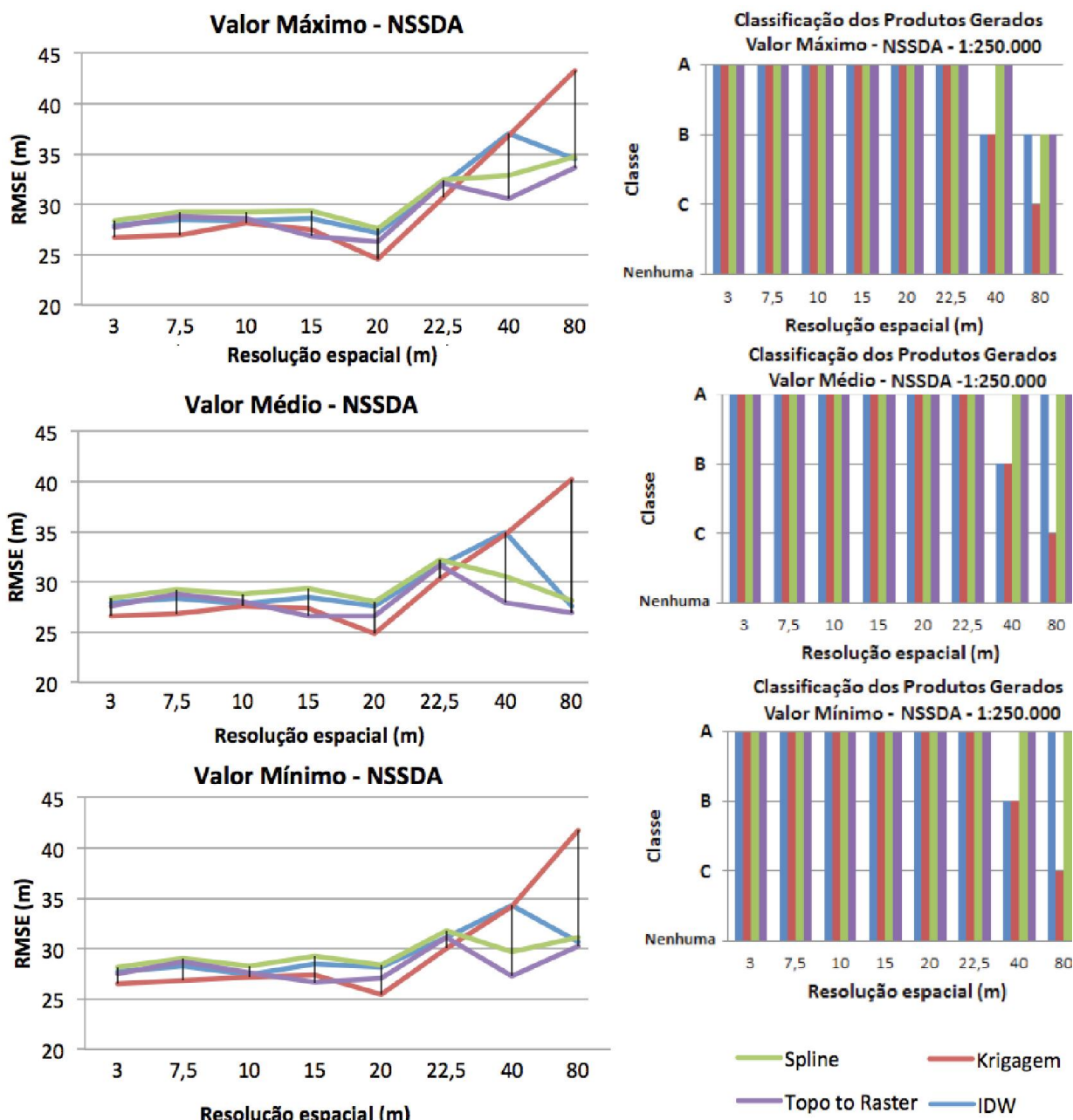


Fig. 4 - Resultados da classificação com 20 pontos de checagem para a escala de 1:250.000.

Quando comparado os valores de RMS com os dados de referência de valores médios, o comportamento é bem parecido com os valores de RMS dos dados de referência de valores máximos e mínimos até a resolução espacial de 22,5 metros, apresentando o mesmo comportamento de discrepância. Para as resoluções espaciais de 40 e 80 metros, os interpoladores apresentaram uma diminuição dos valores de RMS, sendo que o interpolador *Topo to Raster* apresentou o melhor resultado nesta avaliação na resolução espacial de 80 metros, tendo 20 metros como RMS.

No caso dos pontos de checagem seguindo orientação do NSSDA, o RMS médio geral

obtido foi igual a aproximadamente 29 metros, com um desvio por volta de três metros, já para os pontos de checagem criado com base na STANAG 2215, este foi de 24 metros com um desvio de apenas dois metros. A Figura 5 ilustra em resumo os resultados obtidos com 168 amostras.

#### 4.5 Avaliação dos resultados para 500.000 pontos aleatórios de checagem

A avaliação dos produtos gerados com uma amostragem aleatórias com 500.000 pontos de checagem se mostrou bem similar às avaliações feitas anteriormente.

Para a escala de 1:100.000, com 50 metros

de equidistância vertical das curvas de nível, os produtos gerados a partir das interpolações obtiveram Classe C para a grande maioria dos dados. A classe Nenhuma foi obtida somente pelo interpolador *Krigagem* quando comparado com todos os dados de referência nas resoluções espaciais de 3 e 7,5 metros.

Os RMSs apresentados por estas interpolações mantiveram-se bem próximos aos 24 metros, tendo como valor mínimo 23,81 metros para o interpolador IDW, resolução espacial de 3 metros e valor máximo 25,56 metros para o interpolador *Krigagem*, resolução espacial de 7,5 metros.

Nota-se também que os valores do RMS obtidos através dos 500.000 pontos de checagem, estão sempre entre os valores do RMS resultante da amostragem sugerida pelo NSSDA e a amostragem sugerida pela STANAG 2215.

A princípio, o método de amostragem com 20 pontos de checagem obteve o maior RMS, quando comparados à validação com 168 e 500.000 pontos. Neste caso, os 20 pontos de checagem se posicionaram em locais que apresentavam maiores discrepâncias, refletindo assim na classificação final do produto. Quando se aumentou o nível de investigação dos produtos gerados, com 168 e 500.000 pontos de checagem, obteve-se uma porcentagem maior de pontos de checagem apresentando baixos valores de discrepância, o que fez com que o RMS das amostras de discrepâncias diminuísse, quando comparado aos resultados obtidos na validação com 20 pontos de checagem. A medida que se aumenta o número de pontos de checagem (168 e 500.000) aumenta-se a confiabilidade dos resultados obtidos no controle de qualidade posicional dos produtos testados.

A Tabela 2 apresenta um resumo sobre os resultados obtidos para as resoluções espaciais de 3 e 7,5 metros.

## 5. CONCLUSÕES

A partir das análises, ficou evidente que as interpolações feitas para as resoluções espaciais de 22,5; 40 e 80 metros obtiveram os piores resultados, com exceção da comparação feita a partir de 168 pontos de checagem com os dados de referência gerados a partir dos valores médios.

Percebe-se que os produtos cartográficos gerados pelo MDS ASTER GDEM2 seriam

muito bem aproveitados para um mapeamento sistemático na escala de 1:250.000, com equidistância vertical para as curvas de nível no valor de 100 metros. Este resultado contrapõe o exposto por Rodrigues *et al.* (2010), que também avaliaram o MDS gerado pelos dados ASTER GDEM e chegaram à conclusão de que estes dados poderiam ser utilizados para construção e atualização do mapeamento sistemático brasileiro na escala de 1:100.000, correspondendo 50 metros de equidistância vertical entre as curvas de nível. Pode ser que esta diferença tenha ocorrido devido estes autores desconsiderar a não compatibilidade entre os *data* altimétrico dos produtos.

Nas avaliações de acurácia posicional realizadas nos produtos gerados a partir do MDS ASTER GDEM2, obteve-se um RMS das discrepâncias entre 23 e 28 metros, aproximadamente. Este valor de RMS é quase o dobro obtido por Tachikawa *et al.* (2011).

Quando os produtos gerados pelas interpolações foram analisados com apenas 20 pontos de checagem, o interpolador *Krigagem* mostrou-se mais eficiente para as resoluções espaciais de 3 a 22,5 metros. Já quando analisados com mais pontos de checagem, este interpolador apresentou resultados inferiores comparados aos outros interpoladores. Assim sendo, apesar de apresentar melhor resultado quando avaliado com 20 pontos de checagem, este interpolador não foi considerado pelos autores como tendo o melhor desempenho de modo geral por não ter apresentado resultados satisfatórios nas outras amostragens.

Deve-se ressaltar que o interpolador *Topo to Raster*, na validação com 168 pontos de checagem, nos produtos com resolução espacial de 15 metros, sendo a metade da resolução espacial do dado original, obteve os melhores resultados para resoluções espaciais menores que a original.

Por fim, para se trabalhar com dados altimétricos, recomenda-se a utilização do interpolador *Topo to Raster*, fazendo a interpolação com a metade da resolução espacial inicial dos dados. No caso dos dados de entrada serem o ASTER GDEM 2, a escala de trabalho recomendada deste produto é de 1:250.000 para a área de estudo trabalhada.

Durante a realização do trabalho, foi

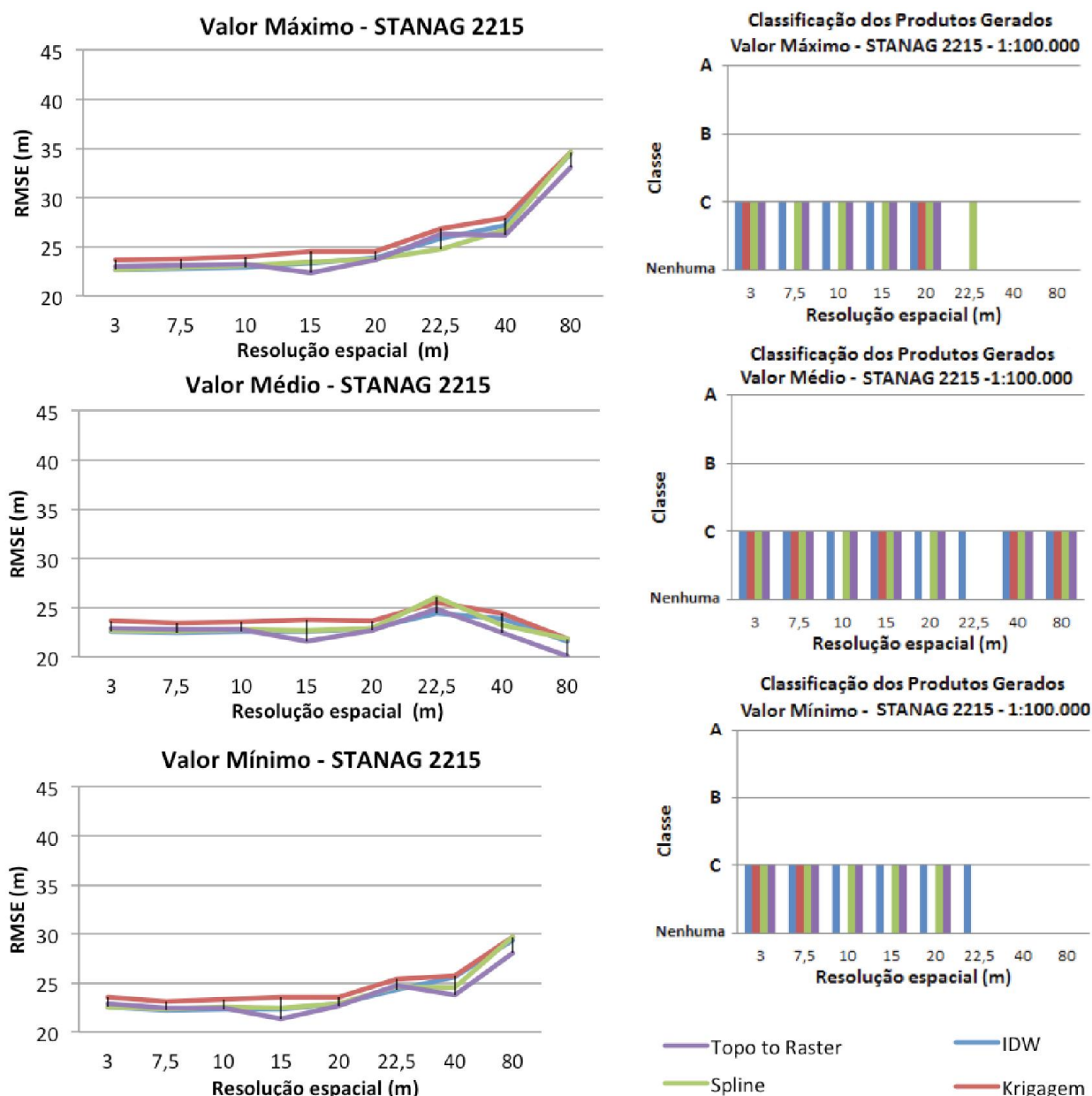


Fig. 5 - Resultados da classificação com 168 pontos de checagem na escala de 1:100.000.

Tabela 2: Resumo dos resultados obtidos pelas resoluções espaciais de 3 e 7,5 metros

Escala	NSSDA (20 pontos)		STANAG 2215 (168 pontos)		Amostra Aleatória (500.000 pontos)	
	1:100.000	1:250.000	1:100.000	1:250.000	1:100.000	1:250.000
Classe A	0	24	0	24	0	24
Classe B	0	0	0	0	0	0
Classe C	0	0	23	0	18	0
Nenhuma	24	0	1	0	6	0
RMS Médio	27,944 m		22,890 m		24,504 m	
Desvio Padrão	0,858 m		0,431 m		0,516 m	

identificado um grande esforço temporal devido a necessidade de processamento de uma grande massa de dados e variáveis utilizadas. Sugere-se ao leitor que, em caso de repetição deste estudo, crie-se uma rotina de processamento, tanto dos dados a serem avaliados quanto dos dados de referência. Esta rotina também diminuiria a possibilidade da inserção de erros humanos no processo, o principal ponto crítico deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem: a disponibilização dos dados LiDAR por parte do Prof. Elpídio Inácio Fernandes Filho, do Departamento de Solos da UFV, juntamente com a empresa VALE e; aos três revisores anônimos que fizeram importantes comentários e sugestões para melhorar o artigo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BOTELHO, M. F.; SILVA, C. R.; SCHOENINGER, E. R.; CENTENO, J. A. S. **Comparação dos resultados de interpoladores “Vizinho mais próximo” e “Inverso de uma distância” no cálculo de volume a partir de dados do laser scanner.** XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil. p. 731-736, 2005.

BRASIL. **Decreto-lei nº 89.817** de 20 de junho de 1984. Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Retirado de: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/1980-1989/D89817.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89817.htm). Acessado em 27/12/2013.

EL-SHEIMY, N.; VALEO, C.; HABIB, A. **Digital Terrain Modeling: Acquisition, Manipulation, and Applications.** Boston/EUA. Artech House. 2005. 270p.

IBGE. **Mapeamento Topográfico.** Retirado de: [http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/default\\_topo\\_int.shtm](http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/cartografia/default_topo_int.shtm). Acessado em: 27/12/2013

ISO. **ISO 19113: Geographic information – Quality principles.** 2002. 29p.

HUTCHINSON, M. F.; STEIN, J. A.; Stein, Janet L.; Xu, T. **Locally Adaptive Gridding of Noisy High Resolution Topographic Data.** 18º Congresso Internacional de Modelagem e Simulação. 13-17 Julho, 2009. Cairns, Austrália

LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. **Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology.** London/UK. Taylor & Francis, 2004. 324p.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R. W.; CHIPMAN, J. W. **Remote Sensing and Image Interpretation.** Nova Iorque/EUA. John Wiley & Sons, 2007.756p.

MARCUZZO, F. F. N.; ANDRADE, L. R.; MELO, D. C. R. **Métodos de Interpolação Matemática no Mapeamento de Chuvas do Estado do Mato Grosso.** Revista Brasileira de Geografia Física, 2011. v-4, p. 793-804.

MAZZINI, P. L. F.; SCHETTINI, C. A. F. **Avaliação de Metodologias de Interpolação Espacial Aplicadas a Dados Hidrográficos Costeiros Quase Sinóticos -** Instituto de Ciências do Mar – LABOMAR, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009. p 53-63.

NASA – ASTER – **Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer.** Retirado de: <http://asterweb.jpl.nasa.gov>. Acessado em: 12/08/2013.

NSDI. **Geospatial Positioning Accuracy Standards. Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy.** United States, 1998. 25p.

RODRIGUES, T. L.; DEBIASI, P.; SOUZA, R. F. de **Avaliação da adequação dos produtos ASTER GDEM no auxílio ao mapeamento sistemático brasileiro –** III Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, p. 01-05, 2010.

OLIVEIRA, L. F. **Análise de Modelos Digitais de Superfície gerados a partir de imagens do sensor PRISM/ALOS** Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências Exatas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011. 163 p.

SANTOS, A. P. **Avaliação da Acurácia Posicional em Dados Espaciais com o uso da Estatística Espacial** Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências Exatas, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010. 128 p.

STANAG. **STANAG 2215: Evaluation of Land Maps, Aeronautical Charts and Digital Topographic Data.** 2010. 28p.

TACHIKAWA, T.; KAKU, M.; IWASAKI, A.; GESCH, D.; OIMOEN, M.; ZHANG, Z.; DANIELSON, J.; KRIEGER, T.; CURTIS, B.; HAASE, J. ABRAMS, M., CRIPPEN, R.; CARBAJAL, C.; MEYER, D. **ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results**. METI & NASA, 27p.

2011.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H. & SCHAEFER, G.R., eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.1-54.