

Avaliação da acurácia vertical e horizontal de modelos digitais de elevação (SRTM PLUS, ALOS WORLD 3D E ASTER GDEM 2) a partir de um MDE de referência

Andressa Karen da Silva Nemirovsky ¹

Gabriel Lousada ¹

Fernando de Souza Antunes ¹

Manoel do Couto Fernandes ¹

¹ Universidade Federal do Rio de Janeiro

Av. Athos da Silveira Ramos, 274 - Cidade Universitária - 21941-916 - Rio de Janeiro –
RJ, Brasil

{andressakne, gabriel.lousada, fer.souza.antunes}@gmail.com; manoel.fernandes@ufrj.br

Abstract. When performing any type of analysis involving cartographic products, a fundamental criterion that must be evaluated is the scale for which the products were generated and its use is recommended. That's because the accuracy of these products will provide one of the indicators of quality of the analysis performed. Therefore, it was proposed to evaluate the altimetric and planimetric accuracy of the SRTM Plus, ASTER GDEM 2 and ALOS World 3D Digital Elevation Models (DEM). The altimetric evaluation was performed based on the Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) and a trend analysis to investigate the existence of systematic errors. Subsequently, a more in-depth evaluation of these models was made with respect to their planimetric accuracy, a question often overlooked in DEM evaluations. For the evaluation of the planimetric accuracy, a comparison of homologous drainage lines between the DEM evaluated and a reference DEM on a larger cartographic scale was made. These drainage lines were used to carry out the necessary assessments according to the established by PEC. The results of the altimetric evaluation shows that all DEM tested can be used with high reliability in the 1: 100.000 scale. However, the performance of the SRTM Plus and ALOS World 3D DEM can be highlighted. That's because, after the correction of systematic errors, these DEM were classified in the 1: 25.000 scale according to altimetry. Regarding the planimetric evaluation, all the models were classified in the scale 1: 100.000, with small superiority of SRTM Plus and ALOS World 3D DEM.

Palavras-chave: cartographic accuracy standards, trend analysis, padrão de exatidão cartográfica, análise de tendência.

1. Introdução

Durante a produção de um material cartográfico é necessário atentar para a escala na qual os insumos cartográficos e os produtos finais podem ser utilizados e quanto ao grau de confiabilidade. Dentre os insumos cartográficos que necessitam de avaliação, um que merece especial atenção são os Modelos Digitais de Elevação (MDE), isto porque, estes modelos servem de insumo para uma série de trabalhos, como por exemplo, a produção de mapas geomorfológicos, ortoretificação de imagens de satélite, cálculos de área em Superfície Modelada, etc. A avaliação da acurácia destes modelos é fundamental, visto que, ela é um dos indicadores que irá conferir confiabilidade aos produtos gerados.

No entanto, a avaliação dos MDE necessita de uma especial atenção, uma vez que estes produtos necessitam possuir não só uma confiabilidade altimétrica, mas também devem ser capazes de fornecer os valores de elevação considerando os aspectos de deslocamento horizontal. A avaliação da acurácia altimétrica dos MDE se dá de maneira relativamente simples, atendendo ao que é proposto pela norma brasileira estabelecida pelo decreto lei de 1984 (Brasil, 1984), que classifica os produtos cartográficos em três classes A, B e C de acordo com Padrão de Exatidão Cartográfica - PEC, com algumas modificações para atender as necessidades de produtos digitais. A avaliação planimétrica, por outro lado, impõe maiores desafios aos pesquisadores pela característica dos MDE, que diferentemente de imagens onde a identificação de feições características para avaliação de deslocamento (como cruzamentos de ruas, por exemplo), não possuem formas facilmente identificáveis.

Motivado por estas questões, o presente trabalho propõe avaliar a acurácia vertical e horizontal de três dos principais MDE disponibilizados de forma gratuita atualmente (SRTM Plus, ASTER GDEM 2 e ALOS World 3D) com resolução espacial de 1 segundo de arco (pixel de aproximadamente 30 metros). A avaliação vertical dos modelos será conduzida seguindo o padrão estabelecido pelo Padrão de Exatidão Cartográfica – PEC, e também, utilizando os novos valores propostos pelo PEC-PCD (ET-ADGV, 2015), que representa um esforço em atualizar as avaliações estabelecidas pelo PEC para atender as necessidades de produtos cartográficos digitais. Como forma de complementar a avaliação altimétrica dos modelos e investigar a existência de erros sistemáticos passíveis de correção, será realizada uma análise de tendência dos MDE de acordo com a metodologia proposta por Vieira & Genro (2013).

A avaliação planimétrica destes modelos será realizada seguindo a metodologia de Santos *et al* (2016), que para superar a falta de feições de fácil identificação nos modelos, propõe a utilização de feições lineares homólogas entre MDE, como as drenagens, para avaliação de possíveis deslocamentos planimétricos. A avaliação de feições lineares é realizada a partir da utilização dois MDE, um que será avaliado, e outro em escala cartográfica maior, e consequentemente mais preciso, que fornecerá a feição linear utilizada como referência.

1.1 Área de Estudo

A área de estudo está situada no Município de Petrópolis, localizado na região serrana do estado do Rio de Janeiro, característica por seu relevo escarpado e de grande rugosidade, o que torna a região de especial interesse para a avaliação da precisão altimétrica e planimétrica dos Modelos Digitais de Elevação.

A região avaliada (Figura 1) consiste nos limites estabelecidos pela Planta Koeler, elaborada pelo Major Júlio Frederico Koeler, em 1846, que foi o produto de um plano urbanístico, conhecido como Plano Koeler. O limite da Planta Koeler foi escolhido como área de estudo por se tratar da área gênese de Petrópolis, importância esta que levou a elaboração de um trabalho maior no qual está inserida esta avaliação de acurácia.

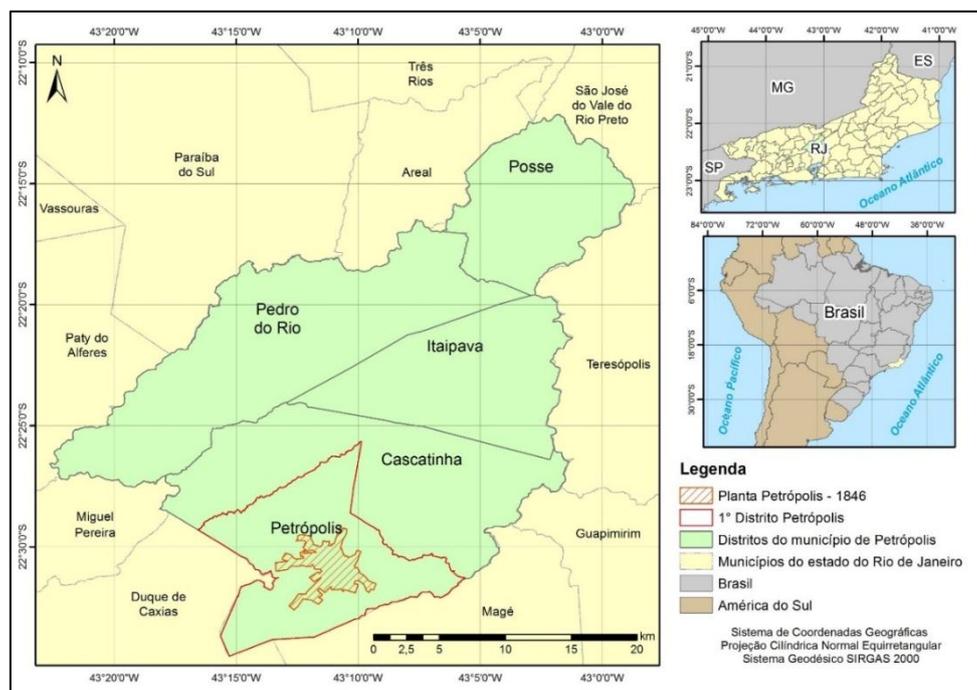


Figura 1. Área de Estudo: 1º Distrito de Petrópolis – Planta Koeler.

2. Metodologia do Trabalho

O presente trabalho propõe avaliar a acurácia vertical e horizontal de três modelos digitais de elevação disponibilizados gratuitamente para determinar a que escala cartográfica esse material pode ser utilizado com determinado grau de confiança. A metodologia foi dividida em três etapas (Figura 2) que serão detalhadas a seguir.

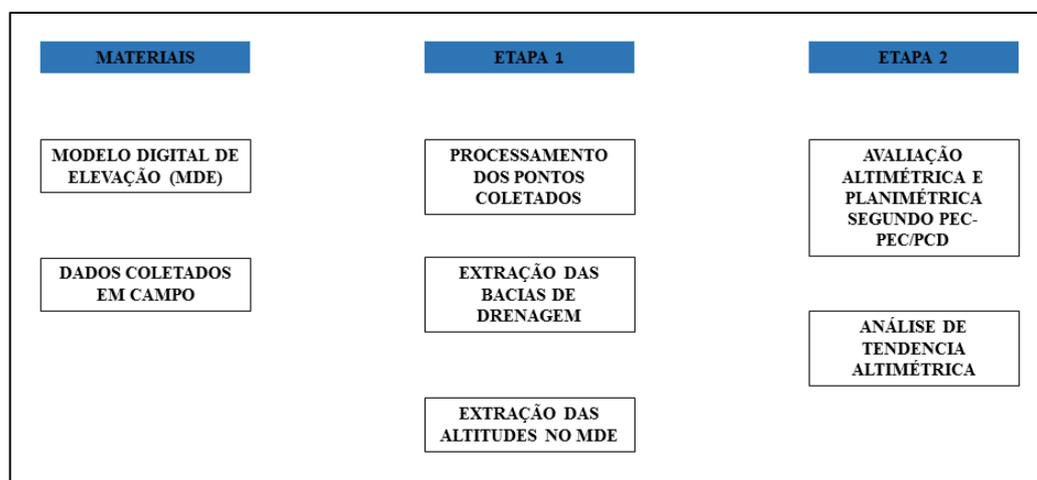


Figura 2. Metodologia

2.1 Materiais

Os materiais (dados de entrada) utilizados no presente trabalho consistem nos modelos digitais de elevação (SRTM Plus, ASTER GDEM 2, ALOS World 3D); um modelo construído a partir da base cartográfica da Prefeitura Municipal de Petrópolis, na escala 1:2.000, que será o MDE de referência para avaliação planimétrica e dados de altimetria coletados em campo para avaliação altimétrica. Foram coletados em campo um total de 30 pontos, utilizando para levantamento um receptor GNSS geodésico.

2.2 Métodos

2.2.1 Processamento dos pontos e preparação dos arquivos

A etapa 1 foi composta pelo processamento dos pontos levantados em campo no *Astech Solutions 3.6*, onde 1 ponto foi perdido devido a interrupções de rastreamento dos satélites, restando assim 29 pontos para serem utilizados na avaliação altimétrica. A partir destes pontos foram extraídos os valores de altitude dos MDE a serem avaliados na posição exata dos pontos levantados em campo, assim como do MDE de referência gerado a partir da base da prefeitura a fim de manter um controle de sua qualidade para avaliação planimétrica.

Em seguida, fez-se a extração das bacias de drenagem dos MDE a serem avaliados e do MDE de referência para realização da avaliação planimétrica.

2.2.2 Avaliação dos Modelos

A etapa 2 foi composta dos cálculos para avaliar a acurácia vertical e horizontal dos quatro modelos e classifica-los de acordo com a PEC e o PEC-PCD. Após a avaliação e classificação dos produtos foi possível realizar a análise de tendência para cada modelo, este teste serviu para identificar erros sistemáticos passíveis de correção nos modelos avaliados, assim como, assegurar a qualidade do modelo de referência utilizado na avaliação planimétrica.

2.2.3 Avaliação da Altimetria

De acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica (Brasil, 1984), para que o um produto seja enquadrado dentro das classes estabelecidas em cada escala, este produto deve atender as especificações de dois testes, são eles: Erro Médio Quadrático (EMQ); e o erro máximo em 90% dos pontos avaliados (LE90). Para o cálculo do Erro Médio Quadrático, inicialmente, calcula-se a discrepância entre a altura do modelo (X_i) e a altura dos pontos coletados em campo (X_r) (Equação 1).

$$\Delta X = X_i - X_r \quad (1)$$

Em seguida é realizado o cálculo do EMQ, em que N = número de pontos coletados em campo (Equação 2).

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum_i (X_i - X_r)^2}{N-1}} \quad (2)$$

2.2.4 Análise de Tendência

De acordo com a Estatística, ao se realizar a análise de tendência, para um determinado número de amostras aleatórias, pretende-se garantir a partir de inferências estatísticas um intervalo de confiança aceitável que garanta a precisão da veracidade dos pontos. Sendo assim, a análise de tendência é feita com o intuito de avaliar que a média dos resíduos é estaticamente igual a zero para 90% dos pontos. Para isso, foi adotado a metodologia proposta por Viera e Genro (2013) utilizando o método da distribuição *t-Student*, o qual considera uma distribuição bicaudal (Figura 3), ou seja, com resíduos amostrais positivos e negativos dos pontos de teste. Ela foi adotada, pois os valores das amostras eram inferiores a 30.

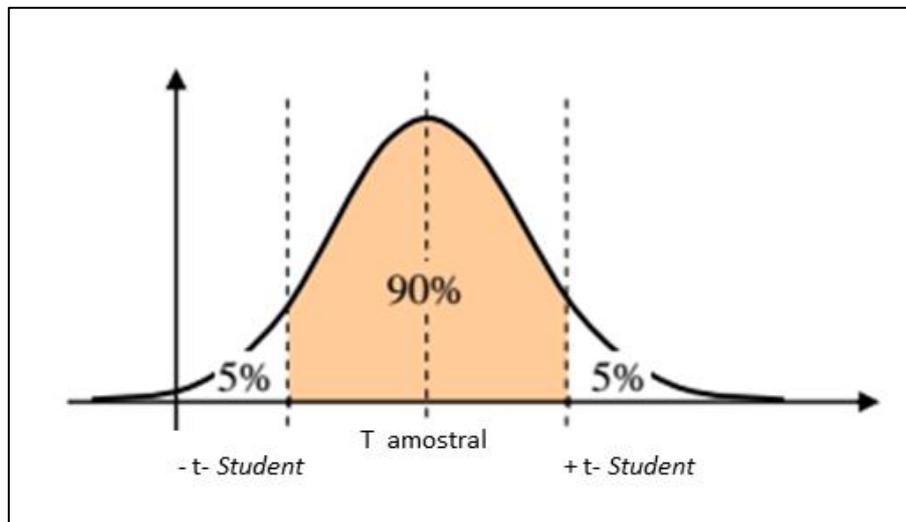


Figura 3. Distribuição Bicaudal. Adaptado de Viera e Genro (2013)

Antes de considerar os valores da distribuição *t-Student*, alguns cálculos foram realizados, como a média (Equação 3); desvio padrão (Equação 4) e o T amostral (Equação 5). E, o valor *t-Student* foi gerado por meio de uma planilha EXCEL por meio da fórmula INVT (1-90; N-1), sendo N o número de amostras, gerando assim um intervalo de confiança ($- t Student \leq t amostral \leq t Student$). As inferências estatísticas foram realizadas com o objetivo de avaliar as hipóteses condicionantes ao intervalo de confiança no qual, a primeira hipótese considera a média dos resíduos de 90% dos pontos serem iguais a zero caso não apresente tendência ($H_0: M = 0$) e a segunda hipótese considera a média dos resíduos de 90% dos pontos serem diferentes de zero caso o modelo apresente tendência ($H_1: M \neq 0$).

A ausência de tendência é verificada quando a hipótese H_0 é aceita, onde a média aritmética das discrepâncias é estatisticamente considerada igual a zero, a um determinado grau de confiabilidade. Se o valor de T amostral estiver fora do intervalo de confiança, a primeira hipótese é rejeitada, o que significa que o modelo digital não é livre de tendência. Sendo assim, existindo tendência nos valores de altitude, esse problema pode ser corrigido subtraindo o valor da média das amostras em cada ponto e novamente é realizado cálculos para classificar o modelo sem a tendência.

$$\text{Média (M): } M = \frac{1}{n} \sum_i^n (X_i - X_r) \quad (3)$$

$$\text{Desvio Padrão (S): } S_{\Delta X} = \sqrt{\frac{1}{(n-1)} \sum_i^n (\Delta X - M)^2} \quad (4)$$

$$\text{T amostral } t = \frac{M}{S} \sqrt{N} \quad (5)$$

2.2.5 Avaliação Planimétrica

Ao avaliar a altimetria e a partir da análise de tendência foi constatada que o MDE gerado a partir da base cartográfica da Prefeitura de Petrópolis, foi o MDE mais bem acurado, que não apresentou tendência. Sendo assim, o MDE prefeitura foi usado como referência para realizar a avaliação planimétrica dos MDE proposto para avaliação. Adotando o método de avaliação proposto por Santo *et al* (2016), em que foram extraídos sete linhas de feições homólogas em ambos os MDE (ASTER GDEM 2, ALOS World 3D, SRTM Plus, MDE de Referência), a saber, linhas de drenagem. A etapa seguinte consistiu na aplicação de um buffer em cada linha de teste e na linha do modelo de referência utilizando como parâmetro para o Buffer o valor definido pelo PEC para cada classe que seria testada (Figura 4).

Em seguida, em cada linha de teste foi calculada a área (A_t) dos MDE (ASTER GDEM 2, ALOS World 3D, SRTM Plus). Com a ferramenta *ERASE (ArcMAP 10.1)*, fez-se a extração da área não sobreposta do modelo da prefeitura em relação ao buffer da linha do modelo de referência, em seguida, a área (A_f) foi calculada.

Dessa maneira, pode-se calcular a discrepância média (dm) para cada linha (Equação 6), verificando se a dm é menor ou igual ao valor do LE90 proposto para cada classe e escala escolhida pelo PEC. O cálculo foi feito para cada linha de teste e referência.

$$dm = \frac{\pi * N * \sum (A_f)_i}{A_t} \quad (6)$$

N = Tamanho do buffer da classe utilizada
 A_f = Área do Modelo de referência não sobreposta
 A_t = Área do Modelo de teste
 $\sum (A_f)_i$ = Soma da área de cada linha

No final, foi calculado o Erro Médio Quadrático (EMQ), que foi comparado com o Erro Padrão (EP) da classe e escala escolhida de acordo com o PEC para avaliação (Equação 7). Ou seja, se o EMQ é menor ou igual que o EP. ($EMQ \leq EP$).

$$EMQ = \frac{\sum_i dm}{n-1} \quad (7)$$

n = número de linhas utilizada.

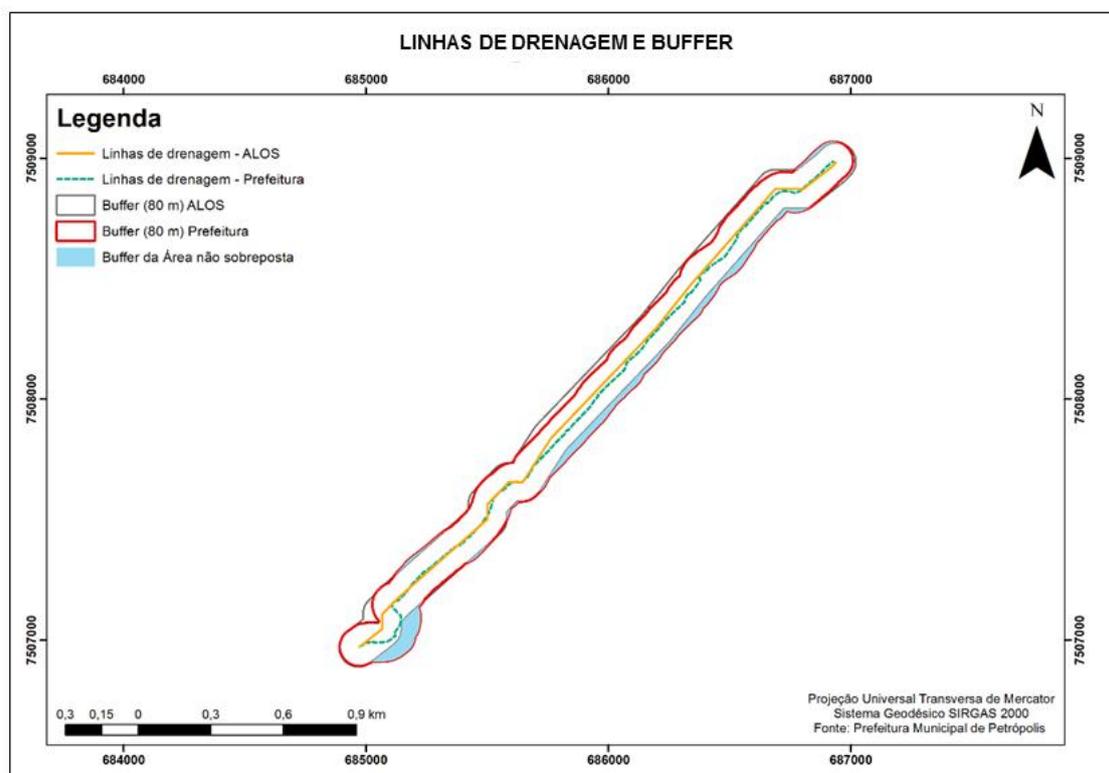


Figura 4. Buffer para linha de teste (no exemplo, ALOS) e linha do modelo de referência (Prefeitura)

3. Resultados e Conclusões

A seguir são apresentados os resultados para a avaliação altimétrica, análise de tendência e avaliação planimétrica dos modelos, assim como, seu enquadramento nas classes do PEC e PEC-PCD.

3.1 Resultados

Na tabela 1 podem ser observados os resultados para avaliação altimétrica dos modelos SRTM Plus, ALOS World 3D, ASTER GDEM 2 e o modelo gerado a partir da base cartográfica de Petrópolis. É possível perceber uma grande similaridade entre os modelos avaliados, sendo todos enquadrados na classe A da escala 1:100.000 do PEC, e na classe B da escala 1:100.000 do PEC-PCD. Apesar de todos terem sido enquadrados na mesma classe, é possível perceber uma superioridade do MDE ALOS World 3D, possuindo os menores valores de EMQ e LE90.

Outro resultado que merece ser destacado é referente a classificação do modelo gerado a partir da base cartográfica, que pode ser enquadrado na escala 1:10.000, sendo classificado como A de acordo com o PEC, e B de acordo com o PEC-PCD.

Tabela 1. Classificação Altimetria dos Modelos de acordo com a PEC e PEC-PCD.

MODELO	EMQ	LE90	PEC	PEC-PCD
ALOS World 3D	10,02	12,25	1:100.000 A	1:100.000 B
ASTER GDEM 2	12,47	15,54	1:100.000 A	1:100.000 B
PREFEITURA	1,49	2,32	1:10.000 A	1:10.000 B
SRTM PLUS	13,53	17,92	1:100.000 A	1:100.000 B

Os resultados da análise de tendência podem ser observados na tabela 2. Este teste confirmou a qualidade do modelo de referência, indicando a ausência de erro sistemático e um erro médio de apenas 0,24 metros. Com relação aos outros modelos avaliados, todos apresentaram erros sistemáticos e passíveis de correção, sendo o modelo ALOS World 3D o que apresentou o maior valor de T amostral, indicando maior tendência e consequentemente, maior potencial de correção.

Tabela 2. Tabela com os resultados da análise de tendência.

MODELO	T amostral	MÉDIA
ALOS World 3D	20,02	9,52
ASTER GDEM 2	8,54	10,42
PREFEITURA	0,89	0,24
SRTM Plus	15,62	12,59

Na tabela 3 podem ser observados os resultados da avaliação dos modelos após a correção dos erros sistemáticos indicados pela análise de tendência e confirmando o potencial desta metodologia para o ajustamento dos modelos. Destaca-se aqui o excelente resultado obtido pelos modelos ALOS World 3D e SRTM Plus, alcançando classificação na escala 1:25.000.

Tabela 3. Classificação Altimetria dos Modelos de acordo com a PEC e PEC-PCD depois de feitas as correções.

MODELO	EP	LE90	PEC	PEC-PCD
ALOS World 3D	2,56	4,39	1:25.000 A	1:25.000 B
ASTER GDEM 2	6,57	10,27	1:50.000 B	1:50.000 C
SRTM Plus	4,33	5,57	1:25.000 C	1:25.000 D

Na tabela 4 podem ser observados os resultados da avaliação planimétrica dos modelos. Todos foram enquadrados na escala 1:100.000, tendo os modelos ALOS World 3D e SRTM Plus obtido os melhores resultados e sendo enquadrados na classe B para o PEC e classe C para o PEC-PCD.

Tabela 4. Classificação Planimétrica dos Modelos de acordo com a PEC e PEC-PCD a partir da extração de linhas homólogas.

MODELO	EMQ	LE90	PEC	PEC-PCD
ALOS World 3D	36,63	37,43	1:100.000 B	1:100.000 C
ASTER GDEM 2	54,39	53,38	1:100.000 C	1:100.000 D
SRTM Plus	42,36	40,00	1:100.000 B	1:100.000 C

3.2 Conclusões

Através das avaliações realizadas foi possível confirmar a boa qualidade dos produtos da missão SRTM, especialmente para médias e pequenas escalas. Outro fator positivo foi a boa classificação do modelo ALOS World 3D, liberado recentemente, com resultados em alguns testes superiores aos observados no modelo SRTM Plus.

Também foi possível verificar a grande eficácia da metodologia para investigação da análise de tendência e correção de erros sistemáticos. Esta análise possibilitou uma correção dos modelos e um ganho substancial de precisão, saindo de uma classificação na escala 1:100.000 para escala 1:25.000 no caso dos modelos SRTM Plus e ALOS World 3D.

Por último, devemos destacar a viabilidade de utilização de linhas homólogas entre modelos digitais de elevação para avaliação planimétrica. Quando disponível um modelo de

maior precisão para a área analisada, esta avaliação se mostrou capaz de suprir uma deficiência de difícil superação acerca da avaliação planimétrica em modelos digitais de elevação.

Referências bibliográficas

BRASIL 1984. Decreto nº 89.817 de 20 de Julho de 1984. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D89817.htm>. Acesso em: Abril de 2015.

ET-ADGV 2015. Norma Da Especificação Técnica Para Aquisição De Dados Geoespaciais Vetoriais De Defesa Da Força Terrestre. Disponível em <<http://www.geoportal.eb.mil.br/index.php/inde2?id=140>>. Acesso em: Julho de 2015.

GALO, M.; CAMARGO, P.de O.; O uso do GPS no controle de qualidade de Cartas. In.: COBRAC – 1994, 1º Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário. Tomo II, Florianópolis – SC, p. 41-48, 1994.

MICELI, B. S.; DIAS, F. M.; SEABRA, F. M.; SANTOS, P. R. A.; FERNANDES, M. C. Avaliação vertical de modelos digitais de elevação (MDEs) em diferentes configurações topográficas para médias e pequenas escalas. RBC. **Revista Brasileira de Cartografia (Online)**, v. 01, p. 191-201, 2011.

SANTOS, A. P.; MEDEIROS, N. das G.; SANTOS, G.R dos; RODRIGUES, D. D.; Avaliação da acurácia posicional planimétrica em Modelos Digitais de Superfície com uso de feições lineares. **Boletim Ciências Geodésicas**, v. 22, n. 1, p.157 - 174, 2016.

VIERA, H.B.G., GENRO, R.S. Estimativa da acurácia posicional de documentos cartográficos na Petrobras a partir do erro máximo provável inferido do erro médio quadrático e da respectiva variância propagada. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 16, 2013, Foz do Iguaçu. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**. São José dos Campos: INPE, 2013. Artigos, p.2038-2045. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/capa.html>>. Acesso em: 20 jul. 2016.