



Revista Brasileira de Cartografia (2017), Nº 69/7: 1263-1276
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

AVALIAÇÃO DA PRECISÃO VERTICAL DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO E ANÁLISE DE TENDÊNCIA EM DIFERENTES DOMÍNIOS GEOMORFOLÓGICOS

Vertical Precision Evaluation of Digital Elevation Models and Tendency Analysis on Different Geomorphological Domain

Gabriel Lousada & Manoel do Couto Fernandes

Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ
Departamento de Geografia – Laboratório de Cartografia - GeoCart
Av. Athos da Silveira, 274. 21491-916 - Cidade Universitária - RJ, Brasil
gabriel.lousada@gmail.com; manoel.fernandes@ufrj.br

Recebido em 17 de Julho, 2017/ Aceito em 9 de Setembro, 2017
Received on July 17, 2017/ Accepted on September 9, 2017

RESUMO

O advento das geotecnologias aliado à disponibilização gratuita de Modelos Digitais de Elevação (MDE) tem sido largamente utilizado para aplicações geomorfológicas, permitindo uma série de avanços no estudo das formas do relevo. Entretanto, é necessário saber até que ponto estes MDE são precisos para serem utilizados nestas análises. Um parâmetro de suma importância para verificar esta precisão é a avaliação vertical destes produtos, pois esta análise é um dos indicadores que fornecem a confiabilidade dos produtos extraídos destes modelos. Neste sentido, o presente trabalho buscou realizar uma análise da precisão vertical de alguns dos Modelos Digitais de Elevação disponibilizados gratuitamente mais utilizados atualmente. Os modelos testados foram: ASTER GDEM 2, ALOS *World 3D*, TOPODATA e cinco diferentes produtos provenientes da missão SRTM. Estes modelos foram avaliados de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica, e posteriormente, foram submetidos a uma análise de tendência que buscou investigar a presença de erros sistemáticos. Foi realizada também uma avaliação individualizada a partir dos domínios geomorfológicos da área de estudo buscando investigar a influência do relevo na qualidade dos produtos testados. Os resultados demonstraram uma grande acurácia vertical do modelo SRTM *Plus*, último MDE disponibilizado da missão SRTM, podendo ser utilizado até mesmo em uma escala 1:50.000 de acordo com a área de estudo. Em relação aos domínios geomorfológicos, os melhores resultados foram encontrados em regiões de relevo pouco ondulado, como por exemplo, nos domínios de planícies costeiras fluvio-marinhas, onde todos os modelos conseguiram se enquadrar na escala 1:50.000. Por outro lado, todos os MDE apresentaram os piores resultados nas regiões de afloramento rochoso e domínio montanhoso, não sendo enquadrados nem mesmo na escala 1:100.000 e indicando que estas áreas merecem especial atenção durante a elaboração de estudos que envolvam feições semelhantes.

Palavras-chave: Avaliação Altimétrica, Análise de Tendência, SRTM, ALOS World 3D, ASTER GDEM 2, TOPODATA.

ABSTRACT

The advent of geotechnologies plus the free availability of Digital Elevation Models (DEM) allowed a number of applications for geomorphological evaluations and advances in the study of relief forms. However, it is necessary to know to what extent these DEM are accurate for use in geomorphology analysis. A very important parameter to check this accuracy is the vertical evaluation of these products, as this analysis provides the reliability of the products extracted from these models. In this sense, the present study attempts to make an analysis of the vertical accuracy of some of the most used and freely available Digital Elevation Models today. The models tested were: ASTER GDEM 2, ALOS World 3D, TOPODATA and five different products of the SRTM mission. These models were evaluated according to the Cartographic Accuracy Standards and subsequently, the models were subjected to a tendency analysis that intended to investigate the presence of systematic errors. It was also performed an individualized analysis of the models according to the geomorphological domains of the study area seeking to investigate the influence of relief on the quality of the products tested. The results showed a great vertical accuracy of SRTM Plus, last released DEM from SRTM mission, and it could be used even on a scale of 1:50.000 according to the study area. Regarding the geomorphological domain, the best results were found in the coastal plain domains and sandy ridges, dunes and salt marshes, where all models were able to fit into a certain class of 1: 50.000 scale. On the other hand, all DEM showed the worst results in the areas of rocky outcrop and mountainous domains, failing into achieve a classification into the 1:100.000 scale and indicating that these areas deserve special attention during the preparation of studies involving similar features.

Keywords: Altimetric Evaluation, Tendency Analysis, SRTM, ALOS World 3D, ASTER GDEM 2, TOPODATA.

1. INTRODUÇÃO

Os Sistemas de Informações Geográficas (SIG), aliados aos produtos originados por sensoriamento remoto, representaram um enorme avanço nas possibilidades de criação de produtos cartográficos de maneira geral. Um destes produtos cartográficos são os de cunho geomorfológico, que ganharam crescente popularidade a partir da disponibilização de uma grande variedade de Modelos Digitais de Elevação (MDE).

Atualmente, uma série de MDE são disponibilizados de forma gratuita e vem servindo como subsídio para diversos tipos de estudos geomorfológicos (WILSON & GALLANT, 2000). Entretanto, é necessário saber até que ponto estes MDE apresentam uma precisão adequada a ponto de serem utilizados em análises que contemplem as características do relevo. Ou seja, ao produzirmos uma representação cartográfica, como mapeamentos geomorfológicos, é importante atentar para uma questão primordial em qualquer espécie de mapeamento, a escala na qual os insumos e os produtos cartográficos finais podem ser utilizados.

Um parâmetro de suma importância para verificar esta precisão em MDE é a avaliação vertical (SANTOS, 2005; BARROS, 2006; MICELI *et al.*, 2011), pois esta análise é um

dos parâmetros que fornece a confiabilidade dos produtos extraídos destes modelos, como a delimitação de formas de encostas (VALERIANO & CARVALHO JUNIOR, 2003), delimitação de bacias de drenagem (OLIVEIRA *et al.*, 2007), identificação de declividade, realização do cálculo de uma área em Superfície Modelada (FERNANDES *et al.*, 2012), elaboração de perfis topográficos, extração de drenagens, classificação geomorfológica digital apoiada por técnicas geomorfométricas (WILSON, 2012), entre outros.

Em face ao exposto, este trabalho propôs realizar a avaliação altimétrica de alguns dos MDE mais utilizados em pesquisas atualmente e disponibilizados gratuitamente para todo território brasileiro. Como forma de realizar uma avaliação compatível com um padrão adotado nacionalmente, todos os produtos foram testados de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), definido pelo Decreto 89.817 de 20 de Julho de 1984 (BRASIL, 1984), e pelo Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Digitais (PEC-PCD), que representa um esforço por parte da Diretoria de Serviços Geográficos do Exército (DSG) e da Especificação Técnica para Estruturação dos Dados Geoespaciais Vetoriais da Força Terrestre (ET-EDGV, 2015) em adequar a avaliação dos produtos cartográficos digitais aos padrões estabelecidos pela Infraestrutura

Nacional de Dados Espaciais (INDE).

Além de realizar a análise da precisão vertical dos modelos seguindo os parâmetros propostos pelo PEC, os MDE foram submetidos a outros testes estatísticos para realização de uma verificação de tendência que buscava investigar a presença de erros sistemáticos nestes produtos (VIEIRA & GENRO, 2013).

Por último, os modelos foram testados em sua precisão vertical utilizando os parâmetros propostos pelo PEC de maneira individualizada de acordo com os domínios geomorfológicos da área de estudo. Este tipo de teste tem a intenção de investigar a influência do relevo na precisão de dados adquiridos por Sensoriamento Remoto, delimitando assim em quais compartimentos geomorfológicos os diferentes MDE são mais eficientes em termos de precisão vertical. Com isso, também se buscou entender como esses MDE se comportam em diferentes condições geomorfológicas com a finalidade de criar um indicativo para escolha do MDE a ser utilizado em um mapeamento em função das características do relevo analisado.

Para entender este comportamento dos MDE levando em consideração diferentes domínios geomorfológicos foi utilizada como área de estudo o estado do Rio de Janeiro, devido à ocorrência de grandes variações de relevo presentes dentro dos limites do estado (Figura 1). Com uma área de cerca de 43.700 km², seu relevo movimentado apresenta diversas regiões contrastantes entre baixadas litorâneas e serras escarpadas, assim como, uma vasta região conhecida como mar de morros.

Também conta como importante fator para a escolha da área, além da disponibilidade de dados para a validação, a sua total cobertura composta por 12 cenas nos produtos SRTM, ASTER e ALOS, e 9 cenas no produto TOPODATA, que foram os MDE avaliados. Esta quantidade de cenas permite realizar uma análise com maior confiabilidade, pois ao evitar a análise em apenas uma cena dos produtos, apesar de aumentar o esforço de processamento, diminuiu a ocorrência de possíveis erros pontuais em alguma das cenas (Figura 2).

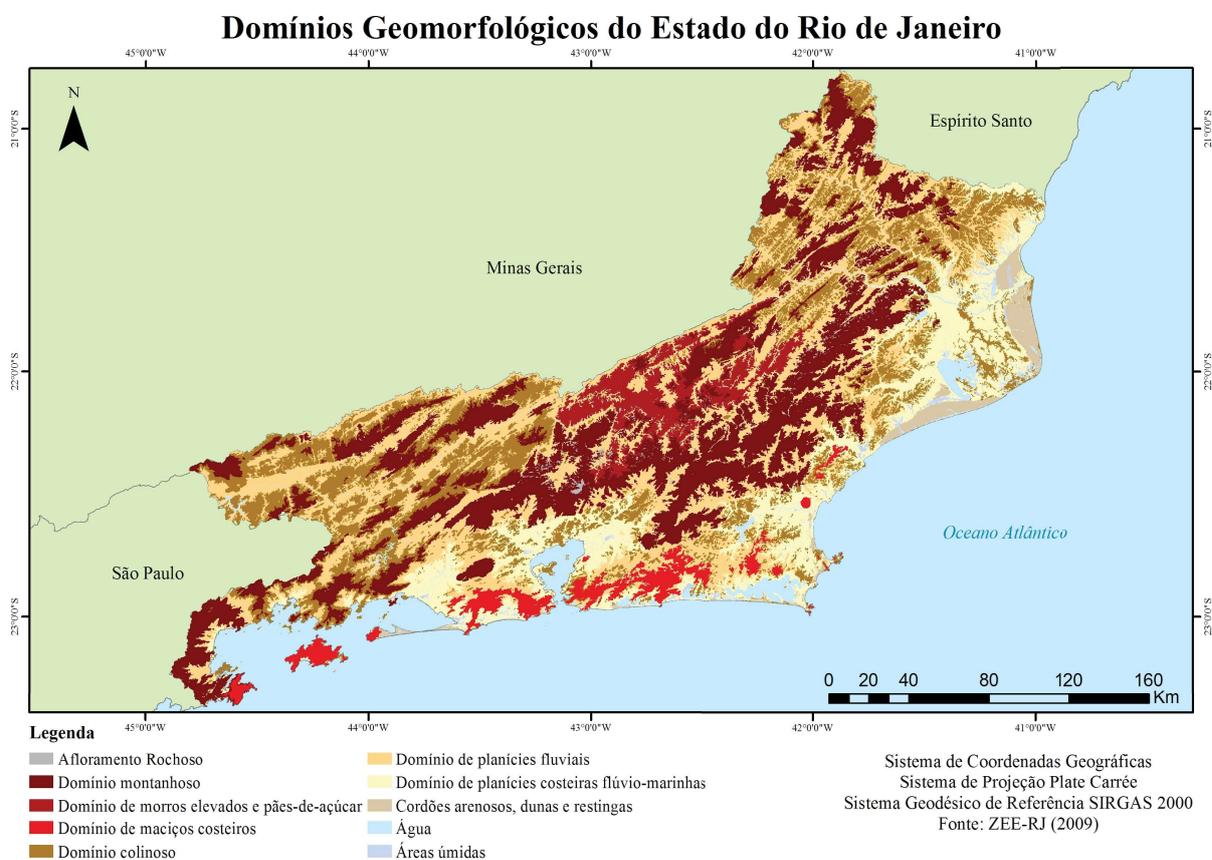


Fig. 1 - Estado do Rio de Janeiro e sua formação geomorfológica movimentada.

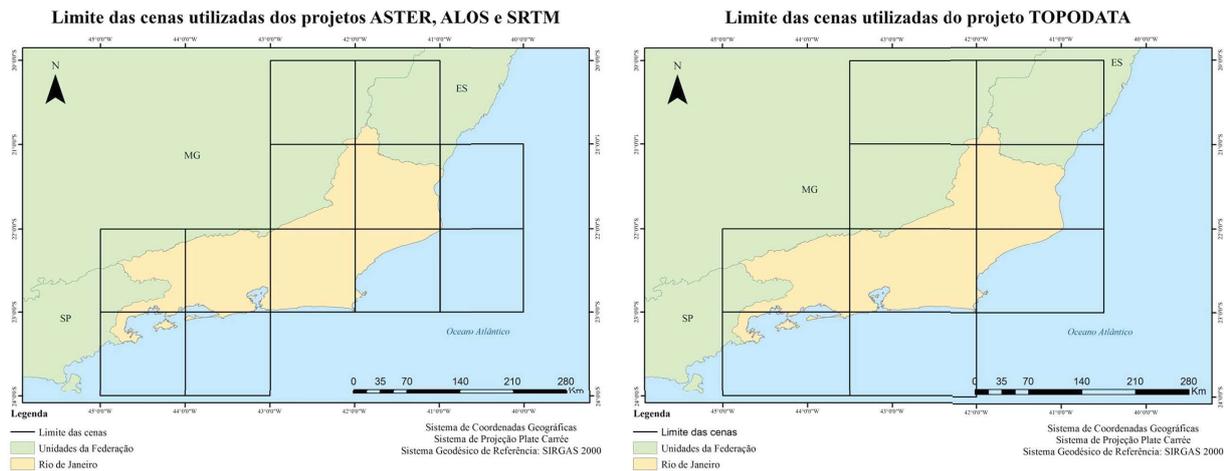


Fig. 2 - Limite das cenas utilizadas na avaliação.

2. MATERIAIS

Os modelos analisados no presente estudo são produtos de três missões para aquisição de dados terrestres a partir de sensores orbitais, foram elas: a missão ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection*), resultado de uma parceria entre o Ministério da Economia, Comércio e Indústria do Japão (METI) e a *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) dos Estados Unidos; a missão ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*), comandada pela Agência Japonesa de Exploração Aeroespacial (JAXA), que contou com, entre outros sensores, o *Instrument for Stereo Mapping* (PRISM); e a Missão Topográfica por Radar do Ônibus Espacial (*Shuttle Radar Topography Mission – SRTM*), também administrada pela NASA, lançada em fevereiro de 2000, e que continua sendo um dos maiores esforços em termos de levantamento topográfico em escala global até os dias atuais (*JET PROPULSION LABORATORY*, 2005).

Além desses MDE, foram utilizados uma série de pontos de controle para validação da altimetria, assim como, um mapeamento geomorfológico da área em questão. As características dos MDE, dos pontos de validação e do mapeamento geomorfológico serão apresentadas a seguir.

2.1 ASTER GDEM 2

Resultante da missão ASTER, o modelo aqui testado, ASTER GDEM 2, baseia-se em um aprimoramento do primeiro produto disponibilizado pelo ASTER, contando agora

com uma resolução espacial de 1 segundo de arco (*pixel* de aproximadamente 30 metros) e possui uma acurácia média que varia entre 7 e 14 metros, segundo o METI. O modelo digital de elevação é construído a partir da aquisição de dados pelo sensor ASTER a bordo do satélite Terra, lançado em dezembro de 1999 com o objetivo de possuir uma vida útil de 6 anos mas que mantém-se ativo até o presente momento. Seu processamento para elaboração do MDE ASTER GDEM 2 baseia-se no princípio de estereoscopia, utilizando pares de imagens de uma mesma região em diferentes ângulos, obtidas por seu sensor capaz de captar informações no infravermelho próximo (*JAPAN SPACE SYSTEMS*, 2014).

2.2 ALOS World 3D

O satélite ALOS, lançado em janeiro de 2006 e operante até abril de 2011, contava com o instrumento de radiômetro óptico PRISM, capaz de captar imagens triplas simultâneas de uma mesma região (à ré, nadir, e à vante) com resolução espacial de 2,5 metros. Apesar de o satélite ALOS não encontrar-se mais operacional, sua missão deixou um legado de mais de três milhões de cenas que foram utilizadas para gerar o modelo ALOS World 3D a partir de princípios de estereoscopia, resultando em um produto disponibilizado gratuitamente com uma resolução espacial de 1 segundo de arco (aproximadamente 30 metros) e uma precisão vertical estimada em 5 metros (*TAKAKU et al.*, 2014).

O MDE ALOS *World 3D* possui áreas em que não existem informações de elevação

proveniente de regiões que possuíam cobertura de nuvens em todas as cenas adquiridas pelo sensor. Estas regiões aparecem no modelo como ausente de informações, ou *No Data* (Figura 3)

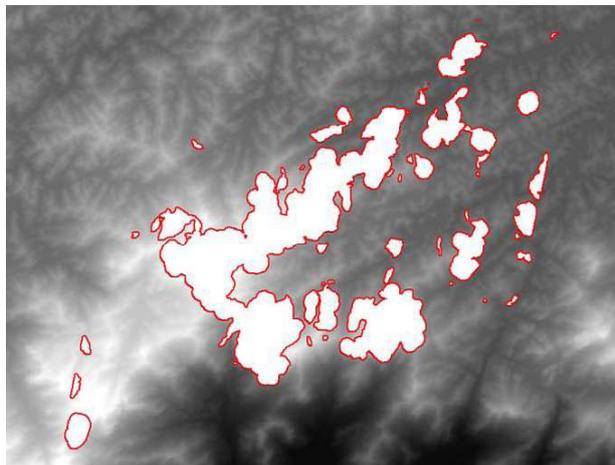


Fig. 3 - Exemplo de regiões com ausência de informações (em vermelho) no MDE ALOS *World 3D*.

2.3 Produtos SRTM

A missão SRTM utilizou um sistema chamado interferometria de passagem única, que trabalha com dois radares localizados em uma mesma plataforma e separados por alguns metros. Na época de seu lançamento esta missão foi a primeira a trabalhar com este tipo de tecnologia, possuindo a bordo do ônibus espacial *Endeavour* duas antenas. Uma delas localizava-se no compartimento de carga e adquiria imagens na banda C e na banda X, a outra antena estava posicionada ao final de uma haste de 60 metros também adquirindo imagens nas bandas C e X. O radar da banda C possui polarizações VV e HH, já o radar da banda X trabalha com polarização VV (*JET PROPULSION LABORATORY*, 2005).

Inicialmente seus dados foram disponibilizados com resolução de 1 segundo de arco apenas para os Estados Unidos, sendo o restante da cobertura possuindo uma resolução de 3 segundos de arco.

Devemos destacar também que as primeiras versões do MDE disponibilizadas pela NASA possuíam áreas com *No Data* correspondentes a regiões de sombreamento do relevo que impossibilitaram a aquisição de dados (Figura 4). Estas sobras ocorrem em áreas que apresentem relevo muito movimentado e com declividades

acentuadas, acarretando com que os pulsos emitidos pelo radar da missão não consigam iluminar a região que encontra-se atrás da feição declivosa. Pode-se observar a partir da figura 4 como as regiões de *No Data* tendem a apresentar um padrão que acompanha as linhas de crista do relevo, um padrão diferente pelo apresentado na figura 3 do modelo ALOS *World 3d*.

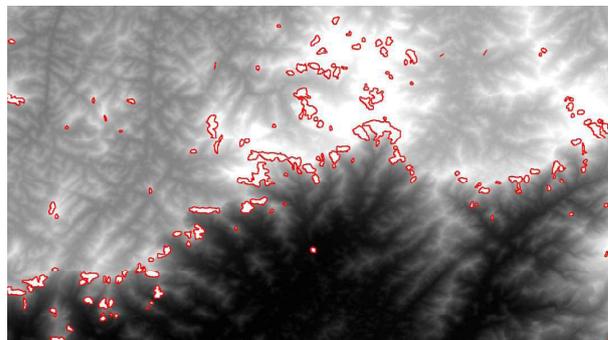


Fig. 4 - Exemplos de regiões com ausência de informações (em vermelho) no MDE SRTM.

É importante observar que as regiões de *No Data* nos modelos ALOS e SRTM são provenientes de diferentes problemas para aquisição de dados, sendo uma de origem climática (presença de nuvens) e outra de origem geométrica (ângulo do sensor em relação ao relevo).

O MDE avaliado referente a este conjunto inicial de dados corresponde ao SRTM V2 (3 segundos de arco e aproximadamente 90 metros de pixel). Posteriormente foram disponibilizadas duas novas versões do MDE que contavam com um preenchimento destas áreas de *No Data* através da interpolação de valores de altitude. Estas foram as versões SRTM V3, disponibilizada pelo *Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC)*, vinculado a NASA; e o SRTM V4 disponibilizado pelo *Consortium for Spatial Information*, uma comunidade global formada com a intenção de garantir o uso sustentável de recursos naturais (CGIAR-CSI). O modelo SRTM V3 utilizou-se dos dados ASTER GDEM para o preenchimento das áreas de *No Data* de forma a criar um MDE que possuísse informações contínuas e baixos níveis de extrapolação.

Em setembro de 2014 os Estados Unidos anunciaram que os dados SRTM com a resolução de 1 segundo de arco (aproximadamente 30

metros de pixel) seriam disponibilizados para todo o planeta, sendo que ao final do mesmo ano este MDE já começou a ser disponibilizado para download para grande parte da superfície terrestre. O primeiro produto disponibilizado contava ainda com as áreas de *No Data* presentes também na primeira versão de 3 segundos de arco. Posteriormente foi disponibilizado pela NASA uma versão chamada *SRTM Plus*, que contava com o preenchimento destas áreas de sombra através de interpolação baseada nos melhores produtos de elevação disponíveis até o momento (Figura 5).

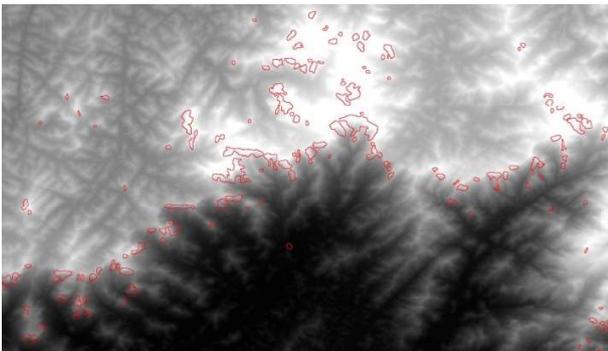


Fig. 5 - Regiões interpoladas (em vermelho) no MDE SRTM Plus.

2.4 TOPODATA

O modelo TOPODATA é um produto gerado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e baseia-se em um projeto que disponibiliza informações altimétricas para todo território nacional a partir de dados obtidos da primeira versão do MDE SRTM. Este projeto realizou um processamento dos dados originais disponibilizados pela agência americana que possibilitou o preenchimento de falhas e um refinamento dos dados de maneira a disponibilizar dados com maior acurácia para todas as regiões do Brasil. Dentre algumas melhorias podemos destacar o refinamento de sua resolução espacial de 3 segundos de arco (inicialmente disponibilizado pela NASA) para 1 segundo de arco (INPE, 2008).

2.5 Pontos de controle e mapeamento geomorfológico

Como forma de validar a altimetria destes modelos foram utilizados como pontos de controle os pontos cotados provenientes da base cartográfica RJ25 em escala 1:25.000,

frutos do mapeamento sistemático do estado do Rio de Janeiro realizado por uma parceria do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) com a Secretaria de Estado do Ambiente do Rio de Janeiro (SEA/RJ). Estes pontos foram obtidos a partir de um levantamento aerofotogramétrico, apresentando assim uma confiabilidade considerada satisfatória para a escala de análise deste estudo. No total foram utilizados 217.744 pontos que cobriram integralmente toda a extensão do estado do Rio de Janeiro.

A fim de avaliar a qualidade dos MDE considerando a influência do relevo, foi utilizado o mapa de domínios geomorfológicos elaborado para o Zoneamento Ecológico-Econômico (ZEE) do Rio de Janeiro na escala 1:100.000, que considerou em sua confecção aspectos de elevação, declividade, hidrografia, entre outros (ZEE-RJ, 2009).

3. MÉTODO DE AVALIAÇÃO

Os métodos de avaliação dos MDE foram divididos em três etapas. A primeira constituiu-se na verificação da precisão segundo o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), definido pelo Decreto 89.817 de 20 de Julho de 1984 (BRASIL, 1984), que incluem o cálculo do Erro Médio Quadrático (EMQ) e da tolerância vertical. A segunda avaliação foi realizada a partir de uma metodologia proposta por Vieira & Genro (2013), que se baseia numa série de cálculos estatísticos com a intenção analisar com maior rigor que o PEC a acurácia posicional dos insumos e produtos cartográficos. Esta etapa consiste na verificação da existência de uma tendência nos erros apresentados pelo produto, entendida como erro sistemático. Esta segunda avaliação foi realizada apenas para quatro modelos, sendo eles o ASTER GDEM 2, ALOS *World 3D*, TOPODATA e o produto melhor avaliado da missão SRTM. Isto porque, por serem provenientes de uma mesma missão e com esforço contínuo, decidiu-se avaliar a tendência apenas do produto com melhores resultados até o momento.

A última etapa da metodologia consiste na análise individualizada dos MDE de acordo com os domínios geomorfológicos presentes no estado do Rio de Janeiro. Dentro desta etapa, foram avaliados todos os pontos localizados

dentro de determinado domínio geomorfológico, assim como, foi realizada uma avaliação apenas dos pontos que possuíam informação proveniente da aquisição inicial, desconsiderando assim as regiões de *No Data* ou com valores interpolados.

3.1 Avaliação segundo o PEC

O Padrão de Exatidão Cartográfica é responsável por avaliar os produtos cartográficos em sua escala de utilização, dividindo-os em três diferentes classes (A, B e C) para cada uma dessas escalas. Para o enquadramento do produto em uma dessas classes é necessário que o mesmo atenda a dois pré-requisitos com valores estabelecidos por lei: o Erro Médio Quadrático (EMQ) e a tolerância vertical em 90% dos pontos (ou LE90 – *Linear Error 90%*).

O cálculo do Erro Médio Quadrático para cada modelo em relação aos pontos de controle da base cartográfica consiste na aplicação da equação 1

$$EMQ = \sqrt{\frac{\sum(Z_i - Z_t)^2}{N-1}} \quad (1)$$

onde, Z_i corresponde ao valor altimétrico do MDE, Z_t é o valor altimétrico do ponto de controle e N representa o número total de pontos de controle.

A tolerância vertical em 90% dos pontos (LE90) corresponde ao erro máximo encontrado no modelo em 90% dos pontos testados.

Os MDE testados no presente trabalho foram avaliados de acordo com sua adequação para duas escalas, 1:100.000 e 1:50.000. Para que estes modelos fossem enquadrados em uma das classes (A, B e C) para estas escalas eles precisariam atender aos seguintes valores (tabela 1).

Tabela 1: Tabela de pertencimento as classes para as escalas 1:50.000 e 1:100.000 segundo o PEC

Classe	Escala			
	1:50.000		1:100.000	
	LE90	EMQ	LE90	EMQ
A	10 m	6,6 m	25 m	16,6 m
B	12 m	8 m	30 m	20 m
C	15 m	10 m	36,6 m	25 m

Nos últimos anos tem ocorrido um esforço por parte do Exército Brasileiro na criação

de um novo sistema de avaliação para os produtos cartográficos que contemple também produtos digitais devido a sua maior utilização e importância atualmente. Estas novas normas estão dispostas no documento das Normas da Especificação Técnica Para Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais de fevereiro de 2015 (ET-ADGV, 2015). Tais normas representam uma atualização das bases estabelecidas pelo PEC, no entanto, estabelecendo com maior rigor a classificação para os insumos cartográficos de natureza digital devido a sua aplicação como dados de base para mapeamentos a serem realizados. Apesar de ainda não ser regulamentado por lei, acredita-se ser importante a sua utilização para avaliações de Modelos Digitais de Elevação.

As metodologias para avaliação dos MDE são as mesmas encontradas no PEC, no entanto, o número de classes existentes no Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) passou para quatro (A, B, C e D). Esta mudança aumentou o rigor para que qualquer modelo seja enquadrado em uma classe A de sua escala de avaliação. Na tabela 2 são apresentados os valores necessários para atingir uma classificação nas escalas 1:50.000 e 1:100.000 de acordo com o PEC-PCD.

Tabela 2: Tabela de pertencimento as classes para as escalas 1:50.000 e 1:100.000 segundo o PEC-PCD

Classe	Escala			
	1:50.000		1:100.000	
	LE90	EMQ	LE90	EMQ
A	5,5 m	3,3 m	13,7 m	8,3 m
B	10 m	6,6 m	25 m	16,6 m
C	12 m	8 m	30 m	20 m
D	15 m	10 m	37,5 m	25 m

3.2 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 valores obtidos nos pontos. Sendo assim, a análise de tendência é feita com o intuito de avaliar que a média dos

resíduos é estatisticamente igual à zero para 90% dos pontos. Para isso, foi adotada a metodologia proposta por Vieira & Genro (2013) para avaliação dos produtos Cartográficos utilizados pela Petrobrás que se baseou em uma pesquisa bibliográfica na área de forma a fundamentar suas avaliações utilizando inferências estatísticas e que possibilitassem enquadrar os produtos em um padrão pré-estabelecido de acordo com a sua acurácia posicional. Para enquadrar a avaliação no que é estabelecido pela lei brasileira, o padrão utilizado para classificação final do produto é também o PEC. Esta metodologia se divide em três etapas que serão detalhadas a seguir, são elas: estimativa da acurácia posicional, enquadramento da acurácia estimada e verificação de tendência.

A estimativa da acurácia posicional é realizada devido à necessidade de se estabelecer um valor central que melhor representa a acurácia do produto a ser testado e um valor de confiança. Este valor central deve considerar o erro, ou resíduo absoluto, visto que o teste leva em consideração a diferença de pontos conhecidos em terreno em relação ao valor extraído do produto que se propõe o teste. A distribuição do erro foi realizada através da distribuição *t-student* considerando o intervalo de 90% de confiança, intervalo este que é o mesmo estabelecido pelo PEC. A estimativa do erro foi calculada pelo Erro Médio Quadrático (EMQ) (Equação 1). No entanto, além do EMQ, também foi calculado o desvio padrão (Equação 2) devido à necessidade de estabelecer um intervalo de confiança dentro do percentual desejado, onde ΔH é o resíduo correspondente e N é o número de amostras.

$$S_{EMQ\Delta H} = \sqrt{\frac{[\sum_{i=1}^N (|\Delta X|_i - EMQ\Delta H)]}{N-1}} \quad (2)$$

A próxima etapa nesta metodologia é o enquadramento da acurácia estimada em um valor pré-determinado, que no caso foram utilizadas as diversas classes estabelecidas pelo PEC. Para realizar este enquadramento é necessário fazer uma alteração na distribuição *t-student* para que os valores passem de uma distribuição dupla (bicaudal) para uma distribuição acumulada (unicaudal), que considere apenas o limite superior do intervalo.

O último passo dessa metodologia consiste na realização da análise de tendência com o intuito de demonstrar que a média dos resíduos é estatisticamente igual à zero, com 90% de probabilidade de acerto. Inicialmente é calculado o valor *t* amostral através da equação 3 e comparado com o intervalo de aceitação definido pela distribuição.

$$t_{amostral} = \frac{\Delta \bar{X}}{S} \sqrt{N} \quad (3)$$

onde $\Delta \bar{X}$ é a média dos resíduos da amostra, S é o desvio-padrão amostral e N é o número de amostras. O desvio padrão amostral S é então calculado através da equação 4

$$S_{\Delta \bar{X}} = \sqrt{\frac{[\sum_{i=1}^N (\Delta X_i - \Delta \bar{X})^2]}{N-1}} \quad (4)$$

onde, ΔX é o resíduo de uma amostra, considerando valores negativos e positivos.

A ausência de tendência ocorrerá quando a média aritmética dos resíduos for estatisticamente considerada igual à zero.

3.3 Avaliação segundo os domínios geomorfológicos

Nesta última etapa todos os modelos foram avaliados baseando-se nos domínios geomorfológicos propostos pelo mapeamento do ZEE (ZEE-RJ, 2009). Inicialmente foram considerados todos os pontos presentes em determinado domínio, sendo incluídos os pontos que não possuíam informações devido à presença de regiões de sombra (*No Data*), assim como as suas respectivas interpolações. Os domínios presentes neste mapeamento e utilizados nesta avaliação foram: Domínio de planícies costeiras fluvio-marinhas; Domínio montanhoso; Afloramento Rochoso; Cordões arenosos, dunas e restingas; Domínio colinoso; Domínio de maciços costeiros; Domínio de morros elevados e pães-de-açúcar; e Domínio de planícies fluviais.

Posteriormente foi realizada uma avaliação excluindo as regiões de sombra ou interpoladas de cada um dos modelos com a finalidade de se obter uma observação mais condizente com a realidade sobre a capacidade daquele modelo

em fornecer dados de determinada feição geomorfológica. É importante destacar que as regiões e a extensão das áreas de *No Data* são diferentes entre os modelos SRTM e o modelo ALOS *World 3D*, visto que a ausência de dados em cada um deles possui origens diferenciadas, sendo a sombra em regiões de alta declividade nos produtos SRTM e a cobertura de nuvens constante no modelo ALOS *World 3D*. A extensão destas áreas com ausência de informação (ou interpoladas, no caso das versões mais recentes do SRTM) para o estado do Rio de Janeiro é de aproximadamente 126 km² para os produtos SRTM e de 123 km² para o MDE ALOS *World 3D*. Todos estes testes foram realizados de acordo com a avaliação proposta pelo PEC.

4. RESULTADOS

Os resultados obtidos a partir da avaliação dos modelos segundo o PEC demonstraram uma superioridade do SRTM *Plus* em relação aos outros modelos tanto em sua tolerância vertical em 90% dos pontos (LE90), quanto no Erro Médio Quadrático. Estes resultados podem ser observados nas figuras 6 e 7.

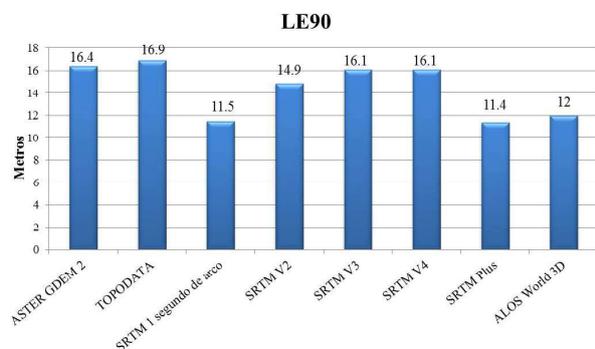


Fig. 6 - Resultados da tolerância vertical em 90% dos pontos avaliados (LE90).

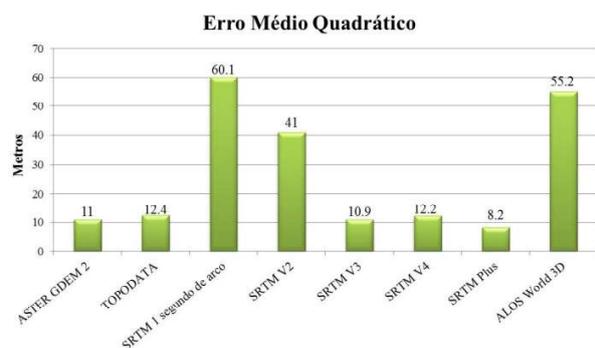


Fig. 7 - Resultados do Erro Médio Quadrático para os modelos avaliados.

A avaliação utilizando os critérios do PEC demonstrou que apenas o MDE SRTM *Plus* estaria apto a ser utilizado na escala 1:50.000 podendo ser enquadrado na classe C. No entanto, com exceção dos MDE SRTM 1 segundo de arco, SRTM V2 e ALOS *World 3D*, todos os outros modelos se mostraram aptos a serem utilizados na escala 1:100.000, sendo enquadrados como classe A. O desempenho inferior apresentado pelos três modelos (SRTM 1 segundo de arco, SRTM V2, e ALOS *World 3D*) se deve ao fato destes modelos contarem com regiões que não possuem informações altimétricas (*No Data*), fazendo com que seus resultados piores significativamente.

A interpolação das áreas de sombra nos modelos SRTM V3, SRTM V4 e SRTM *Plus* permite que seus resultados melhorem expressivamente, a ponto de a última versão liberada ao público, SRTM *Plus*, com *pixel* de aproximadamente 30 metros, consiga ser enquadrada na Classe C ao trabalharmos na escala 1:50.000.

O modelo ALOS *World 3D* ainda não conta com um produto que possua suas regiões de *No Data*, que apresentavam coberturas de nuvem durante a aquisição das cenas, interpoladas. Para que fosse possível ter uma real noção da precisão deste MDE foi realizada uma análise excluindo os pontos que estivessem localizados em regiões com ausência de dados. Esta análise resultou em um enquadramento do MDE ALOS *World 3D* na escala 1:50.000 classe B, apresentando uma tolerância vertical de 11,9 metros e o Erro Médio Quadrático de 7,7 metros.

O enquadramento de todos os modelos nas classes estabelecidas pelo PEC nas escalas 1:50.000 e 1:100.000 pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3: Enquadramento dos modelos avaliados nas classes estabelecidas pelo PEC

MDE	Escala	
	1:50.000	1:100.000
ASTER GDEM 2	-	Classe A
TOPODATA	-	Classe A
SRTM 1 segundo de arco	-	-
SRTM V2	-	-
SRTM V3	-	Classe A
SRTM V4	-	Classe A
SRTM <i>Plus</i>	Classe C	Classe A
ALOS <i>World 3D</i>	-	-

Na Tabela 4 podem ser observados os enquadramentos dos MDE nas classes estabelecidas para os produtos cartográficos digitais (PEC-PCD).

Tabela 4: Enquadramento dos modelos avaliados nas classes estabelecidas pelo PEC-PCD

MDE	Escala	
	1:50.000	1:100.000
ASTER GDEM 2	-	Classe B
TOPODATA	-	Classe B
SRTM 1 segundo de arco	-	-
SRTM V2	-	-
SRTM V3	-	Classe B
SRTM V4	-	Classe B
SRTM <i>Plus</i>	Classe D	Classe A
ALOS <i>World</i> 3D	-	-

Na escala 1:100.000 é possível perceber um rebaixamento na classe de quase todos os modelos, com exceção do SRTM *Plus* que se manteve como Classe A. Os modelos SRTM 1 segundo de arco, SRTM V2 e ALOS *World* 3D continuaram sem poder ser classificados nesta escala. Já na escala 1:50.000 o modelo SRTM *Plus* continua a ser o único a alcançar algum tipo de classificação, no entanto o mesmo passa a ser enquadrado na classe D.

Apesar de não alterar a forma como os produtos digitais são avaliados, o maior rigor nas classes do PEC-PCD fez com que apenas o MDE SRTM *Plus* fosse enquadrado na melhor classificação possível na escala 1:100.000.

A fim de compararmos a influência das áreas interpoladas no SRTM *Plus*, foi realizado um novo teste neste modelo desconsiderando os valores que encontravam-se dentro das áreas de sombra no SRTM original. Este teste permitiu o enquadramento do SRTM *Plus* na Classe B quando trabalhando na escala 1:50.000, apresentando um Erro Médio Quadrático de 7,6 metros e o erro máximo em 90% dos pontos de controle de 11,4 m. Este resultado, quando comparado ao obtido pelo ALOS *World* 3D se também desconsiderarmos as áreas com indisponibilidade de dados, coloca os dois modelos muito próximos em precisão vertical, fazendo com que ambos sejam enquadrados na mesma classe na escala 1:50.000.

Estas avaliações utilizando o Padrão de Exatidão Cartográfica demonstraram o grande potencial dos MDE SRTM *Plus* e ALOS *World* 3D, com ligeira superioridade do primeiro devido a sua acurácia vertical, podendo ser utilizado com alto nível de confiabilidade na escala 1:100.000 ou até mesmo em escalas maiores dependendo da área de estudo e a necessidade do projeto.

Por ter sido o modelo com melhor resultado nas avaliações propostas pelo PEC, o SRTM *Plus* foi submetido à análise de tendência elaborada por Vieira & Genro (2013) juntamente com os modelos ASTER GDEM 2, ALOS *World* 3D e TOPODATA para a investigação de erros sistemáticos no produto. Os resultados desta avaliação podem ser observados na tabela 5.

Tabela 5: Análise de tendência dos MDE

MDE	Tendência (m)
ASTER GDEM 2	-1,92
ALOS <i>World</i> 3D	+1,81
SRTM <i>Plus</i>	+0,97
TOPODATA	-2,13

Os valores apresentados na tabela 5, quando positivos indicam uma superestimação da altimetria do relevo, e quando negativos, que a altimetria está sendo subestimada.

Os resultados obtidos apontam o MDE SRTM *Plus* com um menor erro sistemático, tendendo a superestimar o relevo em menos de 1 metro, enquanto, o modelo que demonstra o maior erro sistemático foi o TOPODATA, apresentando uma subestimação de altimetria de pouco mais de 2 metros. O valor próximo a zero apresentado pelo SRTM *Plus* corrobora com os resultados da avaliação anterior relativa à qualidade do MDE, apresentando um erro sistemático reduzido, principalmente se levarmos em conta à escala para qual é recomendável à utilização do produto. Por ser uma avaliação mais criteriosa e exigindo maior precisão do produto, a análise metodológica desenvolvida por Viera & Genro (2013) enquadraria o MDE SRTM *Plus* na Classe A da escala 1:100.000, no entanto, sem alcançar uma possível classificação para escala 1:50.000. Os resultados para a tolerância vertical em 90% dos pontos segundo esta análise foram de 16,7 metros e o Erro Médio Quadrático de 8,24 metros.

Para se avaliar o potencial da análise de tendência realizada e seu ganho ao efetuar a correção do modelo, um novo teste de acordo com PEC foi realizado para o SRTM *Plus* subtraindo o valor de tendência encontrado (0,97 m), do valor de altimetria do modelo para cada um dos pontos a fim de validar a aplicabilidade desta metodologia. Com a redução de 0,97 metros de toda a altimetria do MDE SRTM *Plus*, o mesmo apresentou resultados próximos ao que foi encontrado quando desconsideramos as áreas com os valores de altimetria interpolados para as regiões de *No Data*. O erro máximo em 90% dos pontos foi de 11,3 metros e o Erro Médio Quadrático de 8,1 metros. Este resultado fez com que o modelo ficasse muito próximo de ser enquadrado na Classe B da escala 1:50.000, mesmo considerando os pontos em áreas de sombra.

4.1 Precisão em relação ao relevo

Nos testes realizados de acordo com a compartimentação geomorfológica do estado do Rio de Janeiro o modelo SRTM *Plus* continuou apresentando o melhor resultado entre todos os MDE analisados. Foi possível observar também a grande dificuldade apresentada pelos modelos em retratar com acurácia a altimetria em regiões de afloramento rochoso, nas quais nenhum dos modelos pode ser enquadrado em uma classificação na escala 1:100.000 quando os pontos localizados em áreas de *No Data* ou interpolação foram considerados. Com a exclusão destes pontos, apenas os modelos SRTM 1 segundo de arco, SRTM *Plus* e ALOS *World 3D* conseguiram ser enquadrados na escala 1:100.000 em regiões de afloramento, tendo o modelo ALOS *World 3D* apresentado o melhor

resultado alcançando uma classificação B.

As regiões que apresentaram os melhores resultados em todos os modelos foram os domínios de planícies costeiras fluvio-marinhas, cordões arenosos, dunas e restingas, e os domínios de planícies fluviais, nas quais quase todos os MDE conseguiram alcançar uma das classes na escala 1:50.000 na avaliação considerando a totalidade dos pontos, com exceção do modelo ALOS *World 3D* que nos domínios de planícies fluviais foi classificado na Classe C da escala 1:100.000 devido a presença de regiões de sombra nesse MDE. As classificações de todos os modelos em cada uma das classes de relevo podem ser observadas nas tabelas 6 e 7. É importante destacar que o modelo ASTER GDEM 2 não foi avaliado excluindo regiões de *No Data* ou interpoladas pois o mesmo não possui dados sobre onde seriam tais regiões. Para o modelo TOPODATA, por ser um produto fruto da missão SRTM, foram utilizadas as mesmas regiões com ausência de informações dos produtos SRTM originalmente disponibilizados.

5. DISCUSSÃO

Através das avaliações realizadas foi possível constatar a alta qualidade dos dados adquiridos pela missão SRTM, produzindo um MDE que pode ser utilizado com confiabilidade aceitável até a escala 1:50.000 de acordo com a área de estudo em questão. O erro sistemático próximo de zero encontrado no SRTM *Plus* corrobora com esta conclusão e possibilita classifica-lo como o melhor MDE disponibilizado gratuitamente para o estado do Rio de Janeiro.

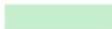
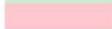
Tabela 6: Classificação de acordo com o relevo incluindo regiões de No Data

Relevo	ASTER GDEM 2	TOPODATA	SRTM 1 segundo de arco	SRTM V2	SRTM V3	SRTM V4	SRTM Plus	ALOS World 3D
Domínio de planícies costeiras fluvio-marinhas	1:50.000 C	1:50.000 B	1:50.000 B	1:50.000 A	1:50.000 A	1:50.000 C	1:50.000 A	1:50.000 A
Domínio montanhoso	1:100.000 A	1:100.000 A	-	-	100.000 A	1:100.000 A	1:100.000 A	-
Afloramento Rochoso	-	-	-	-	-	-	-	-
Cordões arenosos, dunas e restingas	1:50.000 C	1:50.000 A	1:50.000 A	1:50.000 A	1:50.000 A	1:50.000 A	1:50.000 A	1:50.000 A
Domínio colinoso	1:100.000 A	1:100.000 A	1:50.000 C	1:50.000 C	1:100.000 A	1:100.000 A	1:50.000 B	-
Domínio de maciços costeiros	1:100.000 B	1:100.000 B	-	1:100.000 B	1:100.000 B	1:100.000 B	1:100.000 A	1:100.000 A
Domínio de morros elevados e pães-de-açúcar	1:100.000 A	1:100.000 A	1:100.000 A	1:100.000 C	1:100.000 A	1:100.000 A	1:50.000 B	-
Domínio de planícies fluviais	1:50.000 C	1:50.000 C	1:50.000 B	1:50.000 C	1:50.000 C	1:50.000 C	1:50.000 A	1:100.000 C

 MDE com melhor classificação
 MDE não alcançou classificação nas classes avaliadas

Tabela 7: Classificação de acordo com o relevo excluindo regiões de No Data

Relevo	TOPODATA	SRTM 1 segundo de arco	SRTM V2	SRTM V3	SRTM V4	SRTM Plus	ALOS World 3D
Domínio de planícies costeiras fluvio-marinhas	1:50.000 A	1:50.000 A	1:50.000 A	1:50.000 A	1:50.000 A	1:50.000 A	1:50.000 A
Domínio montanhoso	1:100.000 A	1:50.000 C	1:100.000 A	1:100.000 A	1:100.000 A	1:50.000 C	1:100.000 A
Afloramento Rochoso	-	1:100.000 C	-	-	-	1:100.000 C	1:100.000 B
Domínio colinoso	1:100.000 A	1:50.000 B	1:50.000 C	1:100.000 A	1:100.000 A	1:50.000 B	1:50.000 B
Domínio de maciços costeiros	1:100.000 B	1:100.000 A	1:100.000 B	1:100.000 B	1:100.000 B	1:100.000 A	1:100.000 A
Domínio de morros elevados e páes-de-açúcar	1:100.000 A	1:50.000 B	1:100.000 A	1:100.000 A	1:100.000 A	1:50.000 B	1:50.000 C
Domínio de planícies fluviais	1:50.000 C	1:50.000 A	1:50.000 C	1:50.000 C	1:50.000 C	1:50.000 A	1:50.000 A

 MDE com melhor classificação
 MDE não alcançou classificação nas classes avaliadas

No entanto, é necessário também destacar os resultados positivos obtidos pelos testes realizados no modelo ALOS *World 3D* quando são excluídas as regiões de sombra do modelo. Por não contar ainda com uma versão que possua essas áreas interpoladas, como ocorre com alguns dos produtos SRTM, o MDE ALOS *World 3D* não alcança um enquadramento nas classes propostas pelo PEC para as escalas 1:100.000 e 1:50.000 quando são considerados a totalidade dos pontos. No entanto, ao desconsiderarmos as pequenas regiões de sombra, seus resultados se mostram promissores e seu uso pode se tornar recomendado de acordo com a área de estudo.

A análise compartimentada de acordo com o relevo também permitiu a observação da dificuldade dos sensores orbitais para a aquisição de dados em regiões com elevada declividade, como por exemplo, os afloramentos rochosos ou maciços costeiros. Os resultados apontando grandes erros indicam que a sombra presente nos produtos SRTM não é a única característica responsável pela presença de erros altimétricos nestas regiões, mas também a própria natureza do terreno com maiores irregularidades, dificulta a aquisição de dados com grande acurácia independente do método de aquisição de dados do sensor. Quando as regiões de No Data são excluídas da análise, esta torna-se a única classe em que o modelo SRTM Plus não possui a melhor classificação entre os MDE avaliados, ficando atrás do MDE ALOS *World 3D*.

Uma diferença que podemos destacar entre estes dois MDE é o seu formato de aquisição de dados, sendo o SRTM uma missão que utilizou sensores ativos (radar interferométrico) e suscetível ao sombreamento do relevo que

originou as regiões de *No Data*, e a técnica de estereoscopia ótica utilizada na missão ALOS. Acredita-se que os resultados do MDE ALOS *World 3D* tenham sido melhores para as regiões de afloramento rochoso por sua aquisição não ter sofrido com problemas de sombreamento decorrentes de regiões de elevada inclinação, como ocorreu durante a missão SRTM. As regiões de *No Data* do modelo ALOS *World 3D* são provenientes de áreas com constante cobertura de nuvens, gerando assim uma espécie de vazio de dados que não é associada diretamente com o terreno.

Outra possível explicação para os bons resultados apresentados pelo MDE ALOS *World 3D* é devido ao processo de estereoscopia utilizado, onde, diferentemente das técnicas tradicionais realizadas com um par de imagens, este MDE é gerado a partir de uma estereoscopia com três imagens de uma mesma região (*triplet*) com superposição total.

No entanto, mesmo apresentando resultados melhores que o SRTM Plus, a classe de afloramento rochoso ainda teve resultado inferior às outras classes avaliadas nos domínios geomorfológicos, indicando que apesar de o erro proveniente de sombreamento em sistemas de sensores ativos não estar presente no produto da missão ALOS, ele não é o único fator complicador para a aquisição de dados altimétricos em regiões de afloramento rochoso. Pensando nisto propõe-se o questionamento se apenas a declividade está influenciando negativamente os resultados ou se a cobertura do solo pode também de alguma forma influenciar nas respostas dos sensores nestes locais.

É importante destacar que neste trabalho

não foi avaliada a precisão horizontal dos modelos. Este tipo de erro posicional pode significar um aumento ou redução da precisão do MDE, pois partimos do pressuposto que todos os pontos de controle carregam a altimetria da exata porção do terreno representada por aquele pixel onde se extraiu a informação do modelo, ignorando assim, possíveis erros de deslocamento horizontal. Admitiu-se este tipo de variável devido à precisão planimétrica observada nos processos de validação dos modelos realizados pelas agências espaciais norte-americana e japonesa, onde o erro planimétrico médio encontrado para os MDE SRTM foi de 9 metros para América do Sul, 6,1 metros para o MDE ALOS World 3D e para o MDE ASTER GDEM 2 foi de 18 metros. Tais valores se mostram inferiores a resolução dos MDE aqui avaliados (aproximadamente 30 ou 90 metros de pixel) (TADONO *et al.*, 2014; TACHIKAWA *et al.*, 2011; RODRÍGUEZ *et al.*, 2005).

6. CONCLUSÃO

Este trabalho propôs-se a avaliar a qualidade de alguns dos MDE disponibilizados gratuitamente para todo o território nacional. Uma primeira avaliação seguindo o estabelecido pelo Padrão de Exatidão Cartográfica conferiu ao SRTM Plus uma classificação na escala 1:50.000 C, possuindo o melhor desempenho entre os modelos testados. Um aprofundamento na avaliação deste modelo permitiu a identificação de um erro sistemático próximo de zero (0,97 metros), corroborando com os resultados anteriores e confirmando a qualidade do produto em questão. Por último foi realizado uma avaliação individualizando as várias feições de relevo do estado do Rio de Janeiro onde foi possível perceber uma maior dificuldade dos modelos em representar com grande acurácia a altimetria de regiões com relevo acidentado, como por exemplo, os afloramentos rochosos.

É importante destacar que estes resultados não representam a realidade de todas as regiões da superfície terrestre, podendo haver variações em sua qualidade de acordo com a área de estudo. Foi possível observar que a qualidade das informações obtidas a partir dos MDE pode variar principalmente de acordo com dois fatores: a presença de áreas ausentes

de informação (*No data*) ou interpoladas; e o domínio geomorfológico da área de estudo em questão. Ao basear a decisão de qual produto será utilizado levando em consideração estes dois fatores, os resultados obtidos do trabalho a ser realizado tendem a ser maximizados. Por isso recomenda-se que tal avaliação seja sempre realizada para a área de interesse em questão anteriormente ao início de qualquer tipo de análise ou processamento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARROS, R. S. **Avaliação da Altimetria de Modelos Digitais de Elevação Obtidos a partir de Sensores Orbitais**. Tese de Doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Geografia, Depto. de Geografia, IGEO/UFRJ, p.195, 2006.

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: 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: Julho de 2015. 383p.

FERNANDES, M. C.; AVELAR, A. S.; MENEZES, P. M. L.; COELHO NETTO, A.L. Comparação Do Uso De Superfície Real E Planimétrica Para Análises Do Índice De Eficiência De Drenagem: Um Estudo De Caso No Maciço Da Tijuca - RJ. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, p. 29-37, 2012.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS, INPE. 2008. **Modelo TOPODATA**. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/topodata/index.php>>. Acesso: Março de 2015.

JAPAN SPACE SYSTEM, JSS. 2014. **ASTER Global Digital Elevation Model (ASTER GDEM)**. Disponível em: <<http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/E/>>. Acesso: Março de 2015.

JET PROPULSION LABORATORY, JPL. 2005. **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)**. Disponível em: <<http://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>>. Acesso: Março de 2015.

- 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. 63(1), p. 191-201, 2011.
- OLIVEIRA, S. N.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; MENDES DA SILVA, T.; GOMES, R. A. T.; MARTINS, E. S.; GUIMARÃES, R. F.; CORREIA DA SILVA, N. Delimitação Automática De Bacias De Drenagens E Análise Multivariada De Atributos Morfométricos Usando Modelo Digital De Elevação Hidrologicamente Corrigido. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.8, n.1, p.3-21, 2007.
- RODRIGUEZ, E., MORRIS, C. S., BELZ, J. E., CHAPIN, E. C., MARTIN, J. M., DAFFER, W., AND HENSLEY, S. **An Assessment of the SRTM Topographic Products**. Pasadena, USA. 2005.
- SANTOS, P. R. A. dos. **Avaliação da precisão vertical dos modelos SRTM para a Amazônia**. Dissertação de Mestrado – IME. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Cartográfica, Depto. de Engenharia/IME - Instituto Militar de Engenharia, 2005.
- TACHIKAWA, T.; KAKU, M.; IWASAKI, A.; GESCH, D.; OIMOEN, M.; ZHANG, Z.; DANIELSON, J.; KRIEGER, T.; CURTIS, B.; HAASE, J.; ABRAMS, M.; CARABAJAL, C. **ASTER Global Digital Elevation Model Version 2 – Summary of Validation Results**. 2011.
- TADONO, T.; ISHIDA, H.; ODA, F.; NAITO, S.; MINAKAWA, K.; IWAMOTO, H.; Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Volume II-4, p. 71–76, 2014.
- TAKAKU, J.; TADONO, T.; TSUTSUI, K. Generation of High Resolution Global DSM From ALOS PRISM. **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Volume XL-4, p.243–248, 2014.
- VALERIANO, M. M.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; Geoprocessamento de Modelos Digitais de Elevação para Mapeamento da Curvatura Horizontal em Microbacias. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, V. 4, Nº 1, p. 17-29, 2003.
- 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. **Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, p.2038-2045, 2013.
- WILSON, J.P.; GALLANT, J.C. **Terrain Analysis: Principles and Applications**. New York: John Wiley & Sons, 479p, 2000.
- WILSON, J. P. Digital terrain modelling. **Geomorphology**, 137, p.107–121, 2012.
- ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, ZEE-RJ. 2009. Mapa Geomorfológico do Estado do Rio de Janeiro. **Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Rio de Janeiro**.