




Avaliação comparativa da precisão vertical de modelos digitais de elevação derivados de satélites globais gratuitos


Comparative evaluation of the vertical accuracy of digital elevation models derived from free global satellites


Lacerda, Heitor Carvalho; Leitão, Rodrigo; Nero, Marcelo Antônio; Temba, Plínio da Costa; Macedo, Diego Rodrigues

 **Heitor Carvalho Lacerda** heitorcl@ufmg.br
Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

 **Rodrigo Leitão** rmf.leitao@gmail.com
Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

 **Marcelo Antônio Nero** marcelo-nero@ufmg.br
Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

 **Plínio da Costa Temba** temba@ufmg.br
Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

 **Diego Rodrigues Macedo** diegorm@ufmg.br
Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

Revista Espinhaço

Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Brasil
ISSN-e: 2317-0611
Periodicidade: Semestral
vol. 10, núm. 1, 2021
revista.espinhaco@gmail.com

Recepção: 01 Junho 2021
Aprovação: 10 Julho 2021

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/jatsRepo/485/4852255004/index.html>

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5095061>



Este trabalho está sob uma Licença Creative Commons Atribuição-
NãoComercial 4.0 Internacional.

Resumo: Os Modelos Digitais de Elevação (MDE) possibilitam identificar resultantes geomorfológicas e modelar a dinâmica dos processos da superfície terrestre. Identificar e analisar a precisão vertical dos MDE é pertinente para compreender as possibilidades de uso de produtos de sensoriamento remoto, os quais estão periodicamente se atualizando em diferentes versões para melhoria da qualidade. A presente pesquisa comparou diferentes MDE, como o NASADEM, TOPODATA, ASTER GDEM e ALOS AW3D30 em área do bioma Cerrado, no trecho inferior de vertentes. A análise consistiu em amostragem de 1002 pontos homólogos a partir de pontos de controle GNSS com alta precisão, e amostragem em um perfil vertical em 149 pontos homólogos, em direção foz-nascente do trecho do rio Uberabinha. As análises estatísticas realizadas foram a partir de RMSE e de gráficos Box-Plot e de linhas. Os resultados mostraram que o NASADEM foi o mais acurado verticalmente (RMSE 3,8) que os demais MDE, sendo o TOPODATA o MDE de menor precisão (RMSR 8,81). Constatou-se que precisão vertical está mais relacionada ao (re) processamento dos MDE analisados do que com o tipo de aquisição das informações pelos sensores, como o método InSar e fotogrametria.

Palavras-chave: RMSE, NASADEM, ASTER GDEM, ALOS AW3D30, TOPODATA.

Abstract: Digital Elevation Models (DEM) make it possible to identify geomorphological results and model the dynamics of processes on the earth's surface. Identifying and analyzing the vertical accuracy of DEMs is relevant to understand the possibilities of using remote sensing products, which are periodically updated in different versions to improve quality. This research compared different DEM, such as NASADEM, TOPODATA, ASTER GDEM and ALOS AW3D30 in the Cerrado biome area, in the lower slopes. The analysis consisted of sampling 1002 homologous points from GNSS control points with high precision, and sampling in a vertical profile in 149 homologous points, towards the mouth-east direction of the Uberabinha river section. Statistical analyzes were performed

using RMSE and Box-Plot and line graphs. The results showed that NASADEM was the most accurate vertically (RMSE 3.8) than the other DEMs, with TOPODATA being the least accurate DEM (RMSR 8.81). It was found that vertical accuracy is more related to the (re)processing of the analyzed DEMs than to the type of acquisition of information by sensors, such as the InSar method and photogrammetry.

Keywords: RMSE, NASADEM, ASTER GDEM, ALOS AW3D30, TOPODATA.

1. Introdução

O Modelo Digital de Elevação (MDE) é um produto cartográfico digital elaborado a partir de um modelo matemático, que estrutura de forma adequada, em malha contínua, as informações planialtimétricas da superfície terrestre (Ferreira, 2014; DSG, 2015; Morais, 2017). O MDE é classificado em Modelo Digital do Terreno (MDT), quando representa a superfície da terra com referência ao solo, ao desconsiderar a cobertura vegetal e infraestrutura antrópica e, é classificado em Modelo Digital de Superfície (MDS), quando esses elementos acima do solo não são ignorados (Mudd, 2020). Há uma série de aplicações existentes para os MDE, como visualizar perfis e secções transversais altimétricas no terreno, derivar imagens sombreadas, calcular declividade do terreno, orientação das vertentes (Andrade, 2008), apoio ao mapeamento de solos (Chagas et al., 2010), na identificação das feições geomorfológicas (Grohmann et al., 2008), no plano da colheita arbórea (Ferreira et al., 2017), no apoio a identificação de áreas de preservação permanente e cursos d'água em bacias hidrográficas (Teruya Junior et al., 2016), dentre outros.

Iniciativas internacionais fornecem, de forma gratuita, MDE a nível global, como a Shuttle Radar Topography Mission – SRTM (USGS, 2005), a qual possui diferentes versões melhoradas para diferentes regiões do mundo. No Brasil, o projeto TOPODATA, do Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE), oferece o MDE derivado das imagens do sensor ASTER, do satélite Terra (EOS-AM1), e o MDE AW3D30, do satélite Advanced Land Observing Satellite (ALOS) por exemplo. Apesar do MDE estar mais acessível atualmente, o uso indiscriminado dos mesmos pode levar a erros nas aplicações finais e, portanto, ao se tratar de um produto cartográfico, deve-se verificar e estimar os erros toleráveis (Nero, 2005).

A precisão vertical é um dos parâmetros mais analisados nos MDE, visto que é influenciada pelas características do relevo, cobertura do solo e pelos processos de aquisição e tratamento das informações pelos sensores, por exemplo (Mudd, 2020). No Brasil existem investigações que analisaram a precisão vertical de diferentes MDE (Carmo et al., 2015; De Souza, 2015; Lousada e Couto Fernandes, 2017; Marotta et al., 2020; Viel et al., 2020), porém nota-se a necessidade de mais estudos envolvendo diferentes produtos e com versões mais recentes, considerando-se necessário análises comparativas. Nessa perspectiva, qual MDE gratuito é mais próximo da realidade altimétrica do terreno de uma pequena área no Cerrado mineiro? A previsão esperada é que o MDE criado a partir de informações coletadas pelo método de interferometria de radar com

abertura sintética (InSar) e fotogrametria não se diferenciam muito na precisão do eixo Z, devido as características da cobertura e do terreno da área analisada, com predomínio de relevo pouco declivoso, composto por fundo de vale e encosta, além de cobertura de vegetação campestre e pastagem na sua maior parte.

2. Matérias e Métodos

2.1 Áreas de estudo

O levantamento dos pontos de controle Global Navigation Satellite System (GNSS) foi realizado na região norte do município de Uberlândia, às margens do rio Uberabinha (Figura 1). O referido município está localizado a Oeste do Estado de Minas Gerais, na Mesorregião do Triângulo Mineiro. O bioma da região é o Cerrado e o município apresenta ocupação do solo com predomínio de pastagem e terras cultivadas, com presença de Latossolos Vermelhos-Escuros e relevo de colinas. O clima da área de estudo é o tropical de altitude (Aw) com sazonalidade nítida, concentrando chuvas no período de outubro a abril e seca no restante do ano, de acordo com a classificação de Koppen (Rosa et al., 1991).

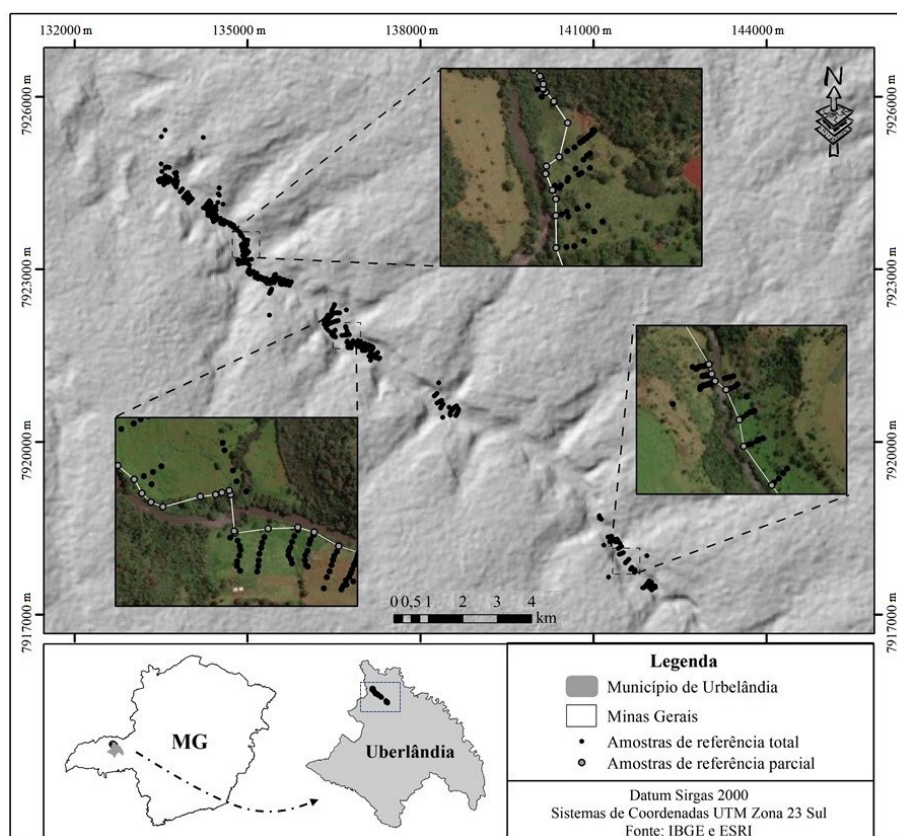


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo e das amostras de referência utilizadas no estudo IBGE (2010), ESRI (2020).

2.2 Descrição dos materiais

Os pontos amostrais GNSS coletados em campo em 2017, já foram adquiridos com correção pelo Posicionamento por Ponto Simples (PPP) utilizando a órbita

de 11 dias e o modelo MAPGEO2015 (IBGE, 2015), garantindo-se precisões melhores que 50 cm para a região de estudo, conforme pesquisas e trabalhos publicados por Blitzkow et al. (2015), IBGE (2015), Matos et al. (2016), ou seja, sendo compatível para a avaliação de precisão altimétrica compatível à escala 1:2.000. No total foram adquiridos 1002 pontos para uso na pesquisa

O Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) é uma iniciativa da National Imagery and Mapping Agency (NIMA) e da National Aeronautics and Space Administration (NASA), que dispôs de um sensor radar no onibus espacial Endeavour, que imageou a superfície terrestre com o objetivo de criar um modelo digital de elevação a nível global (entre as latitudes 60° S e 60° N, 80% da superfície terrestre), durante 11 dias no ano de 2000 (Purinton e Bookhagen, 2017). A versão NASADEM foi utilizada na pesquisa, sendo um novo modelo produzido a partir do reprocessamento do SRTM, com o intuito de melhorar a precisão vertical e reduzir os vazios da versão original. Assim, o modelo digital de terreno foi elaborado a partir do reprocessamento dos dados originais combinados com as informações refinadas do modelo ASTER GDEM, baseado em algoritmos avançados de interferometria (Crippen et al. 2016). A versão NASADEM pode ser baixada no site (<https://earthdata.nasa.gov/eosdis/daacs/asf>). Outra versão utilizada do SRTM foi o TOPODATA (Valeriano e Rossetti, 2012), projeto brasileiro liderado pelo Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (INPE), cujo objetivo foi refinar a resolução e qualidade dos dados SRTM. Dessa formahouve o preenchimento de falhas e are amostragem para resolução espacial mais precisa, baseado em interpolação de dados altimétricos do território brasileiro (<http://www.dsr.inpe.br/topodata/>).

O terceiro MDE utilizado foi a versão 3 do Advanced Spaceborne Thermal Emission (ASTER) Global Digital Elevation Model (GDEM), iniciativa do Ministério da Economia, Comércio e Industria (METI) do Japão e da NASA, produto gerado a partir de processamento estereoscópico de mais de 2,3 milhões de imagens do sensor VNIR, a bordo do satélite Terra (entre as latitudes 83° N e 83° S). As imagens ASTER GDEM podem ser baixadas do site (<https://earthdata.nasa.gov/eosdis/daacs/asf>).

O quarto e último MDE usado na pesquisa foi derivado do Advanced Land Observing Satellite (ALOS) World 3D (AW3D30), da Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), que foi gerado a partir de imagens pancromáticas do sensor PRISM, que coleta dados a partir de três posições, como no nadir, forward e backward e utilizou processamento a partir de estereoscopia das mesmas. O produto pode ser baixado no site da JAXA (<https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm>).

Todos os MDE utilizados na pesquisa possuem resolução espacial de 1 arc-sec (~30 metros, que generaliza uma área de ~900 m²).

2.3 Pré-Processamento das imagens

Foram baixadas as cenas de cada um dos MDE e não houve a necessidade de recorte da imagem. Transformou-se os datum de cada produto para Sirgas 2000 e para o sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator (UTM), zona 22 sul. Houve averiguação de possíveis erros espúrios, porém não foi identificado vazios na área de estudo.

2.4 Amostragem de pontos homólogos

A extração dos pontos homólogos foi realizada por amostragem para as análises estatísticas posteriores no software ArcGis™ 10.8. Em algumas análises estatísticas realizadas no presente estudo foram utilizados todos 1002 pontos GNSS coletados em campo, já em outras análises foram utilizadas amostragens lineares seguindo o curso do rio (direção foz-nascente), totalizando 149 pontos homólogos. A localização e a distribuição desses pontos homólogos podem ser visualizadas na Figura 1, tanto para amostragem total, quanto parcial (amostragem linear).

2.5 Métodos estatísticos para avaliação da precisão vertical

A exatidão e precisão são termos que devem ficar esclarecidos neste tipo de pesquisa, pois são muitas vezes confundidos e podem levar a equívocos. O primeiro termo pode ser determinado como o grau de informações espaciais registradas em relação à posição verdadeira, em função de uma referência; já o segundo termo remete ao grau de adesão ou concordância de mensurações realizadas em condições similares, como o desvio padrão das informações observadas (Celestino e Philips, 2016). Neste sentido, utilizou-se o Erro da Raiz Quadrada Média (RMSE) vertical (1), que é um método de uso comum nas Geociências para medir a precisão de MDE.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [(Z_{Ref} - Z_{MDE})^2]} \quad (1)$$

Onde Z_{Ref} é o eixo Z dos pontos GNSS e Z_{MDE} é o eixo Z de cada MDE testado na pesquisa.

Todos os 1002 pontos de referência foram utilizados no RMSE para análise da precisão dos MDE, sendo também avaliados a média e o desvio padrão dos erros aleatórios.

O grupo de pontos de referência correspondente à amostragem em perfil longitudinal às margens do rio Uberabinha foi avaliado por gráfico de linha, com R^2 , a partir de linha tendencial polinomial de 6ª ordem, que permitiu observar a altitude da referência e das altitudes dos MDE. A projeção em linha dos MDE no gráfico permitiu calcular a área sob a curva, a partir da fórmula da área do trapézio (Figura 2). Antes de realizar o cálculo foi necessário normalizar todos os valores altimétricos dos MDE para intervalos compreendidos entre 0 e 1.

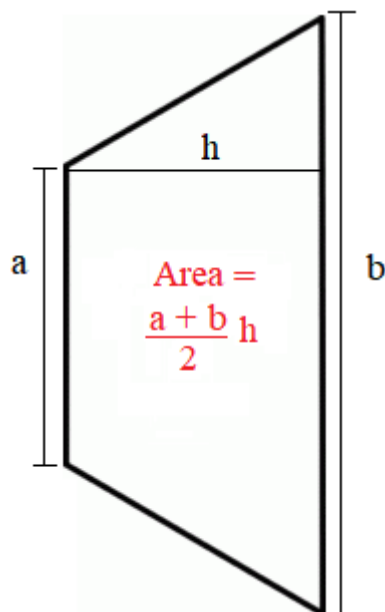


Figura 2. Representação e formula da área do trapézio para cálculo da área sob a curva
Elaboração própria

Por fim utilizou-se o gráfico Box-Plot, que destaca os valores máximos, mínimos, amplitude, quartil, mediana e média, para todos os MDE e a referência, considerando os valores de erros aleatórios.

3. Resultados

Os RMSE dos MDE analisados mostram que o produto NASADEM possui precisão duas vezes melhor do que os produtos TOPODATA e ASTER GDEM (Tabela 1). A média dos erros também se manteve menor no produto NASADEM e, o desvio padrão, deste MDE e do ALOS AWD30 apresentou menor variação em torno da média.

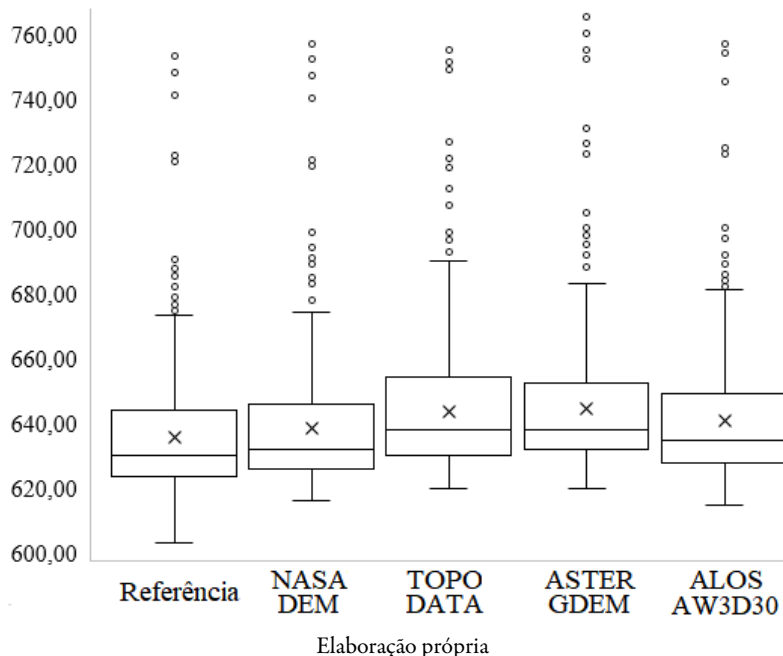
Tabela 1. Precisão dos MDE

	RMSE	Média	Desvio Padrão
<i>NASADEM</i>	3,80	2,45	2,90
<i>TOPODATA</i>	8,81	7,54	4,55
<i>ASTER GDEM</i>	9,96	8,74	4,77
<i>ALOS AW3D30</i>	5,78	5,01	2,88

Elaboração própria.

Em relação à diferença às cotas altimétricas, pode-se observar que existem outlier em todas as amostradas do MDE (Gráfico 1), assim como nas amostras de referência. Também, não é observado diferenças estatísticas significativas entre

os MDE, apesar de uma imagem ser mais ajustada a referência do que as outras. A mediana (630m) e a média (635m) mais próximas das amostradas de referência são as amostras do MDE NASADEM (mediana 632m e média 638m), enquanto as amostras mais distantes foram a do MDE TOPODATA (mediana 638m e média 643m).



O perfil longitudinal (Gráfico 2) elaborado no trecho do rio Uberabinha, mostra que o único MDE que apresentou valor altimétrico abaixo dos pontos de referência foi o produto NASADEM, entre os pontos 110 a 130 e após 140. O NASADEM é a imagem que mais se ajusta no trecho analisado ($R^2 = 0,93$) e possui menor área sob a curva após a referência (Área = 47,5), apesar de constar ruídos (distância dos pontos homólogos do MDE a referência). Os produtos ASTER GDEM e TOPODATA apresentaram cristas mais distantes da referência que os demais MDE, que corrobora com as informações anteriores de acurácia destes dados, apesar do TOPODATA (Área/ $R^2 = 55,3/0,92$) apresentar ajuste significativamente maior do que o ASTER GDEM (Área/ $R^2 = 57,8/0,84$). É notável que as áreas que possuem terrenos íngremes apresentaram menores discrepâncias entre a referência e os MDE.

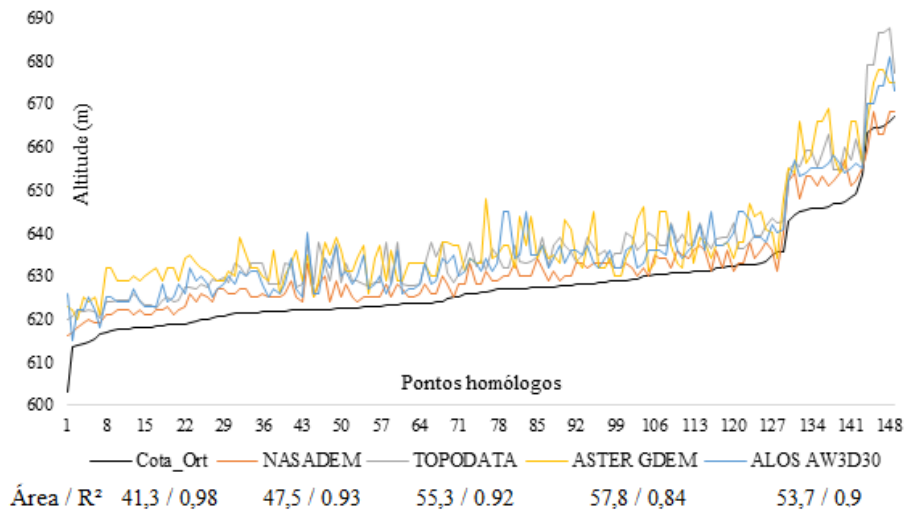


Gráfico 2. Perfil longitudinal do trecho do rio Uberabinha com informações altimétricas da referência e dos MDE

Elaboração própria

4. Discussão

Os MDE analisados são adquiridos de duas formas que impactam diretamente na qualidade posicional (eixos x, y e z) dos produtos. As imagens SRTM, as quais derivaram o NASADEM e o TOPODATA a partir de reprocessamento, foram geradas por interferometria de radar com abertura sintética (InSar), que se caracteriza por ser um método ativo de imageamento que emite ondas eletromagnéticas na superfície terrestre e o sensor capta seu retorno por ondas completas ou discretas (Glennie et al., 2013; Mudd, 2020). Por outro lado, o ASTER GDEM e o ALOS AW3D30 são adquiridos por fotogrametria, processo que interage as imagens das bandas do visível e do infravermelho por diferentes ângulos (Toutin, 2001). O método InSar tem a vantagem ao gerar imagens mais próximo de um MDT, por possuir comprimento de onda que permite penetrar no dossel das matas, como nas bandas C e X (entre 2,5 a 7,5 cm) como no caso do SRTM (Balzter, 2001); enquanto os MDE elaborados por fotogrametria conseguem captar a superfície a nível das coberturas da superfície, se aproximando mais do MDS do que do MDT. Na presente análise não foi observado a melhor eficiência dos modelos elaborados a partir do InSar sobre fotogrametria, ou o inverso, visto que o ALOS AW3D30 foi mais acurado do que o TOPODATA e, por sua vez, o NASADEM foi mais preciso do que o ALOS AW3D30. Essa constatação sugere que a forma e o tipo reprocessamento influenciam na precisão vertical dos MDE mais do que o método de aquisição das informações.

A precisão vertical dos MDE é influenciada pela morfologia local do terreno, tanto que existem divergências em relação à maior e menor precisão do produto em detrimento de sua inclinação (Tang et al., 2001; Mesa-Mingorance). Em pesquisas de precisão vertical com relevos topograficamente mais rebaixados, o ALOS AW3D30 é mais preciso do que os demais MDE (Alganci et al., 2018; Florinsky et al., 2018; Yap et al., 2018) e, ao analisar a precisão vertical do ALOS

AW3D30, SRTM v.3 e ASTER v.2, em diferentes terrenos, foi constatado que o ASTER teve pior precisão entre os MDE (Yap et al, 2018; Apeh et al., 2019). No entanto, quando o terreno apresentou menores declividades, o ALOS AW3D30 foi mais preciso. A presente área de estudo apresenta relevo mais suave e com cobertura vegetal ripária, formação campestre e pastagem, características que por outras pesquisas beneficiariam a melhor precisão vertical do AW3D30 sobre os outros MDE analisados. Contudo, o NASADEM apresentou melhores precisões nessas condições.

A precisão vertical dos MDE estudados mostra que a imagem NASADEM possibilita análises geomorfológicas mais confiáveis na área de estudo, principalmente em modelagem da dinâmica fluvial e perfis longitudinais e transversais do terreno, devido à aproximação desse produto com um MDT. Por outro lado, a diferença estatística entre os pontos de referência e os demais MDE, que se apresentou pouco significativa, viabiliza o uso de todos os MDE.

5. Conclusões

O produto NASADEM obteve precisão superior aos outros MDE, sendo um pouco superior ao ALOS AW3D30 e duas vezes mais precisa que o TOPODATA e ASTER GDEM. O NASADEM se ajustou melhor às informações de referência ao ser analisado no gráfico Box-Plot e de linha, que realçou altimetria dos pontos homólogos. Isso abre possibilidades da utilização de um produto mais recente e que pode ser aplicado nas mais diversas e novas pesquisas que vierem a ser desenvolvidas.

Os resultados sugerem que a precisão vertical está mais relacionada ao (re)processamento dos MDE analisados do que o tipo de aquisição das informações pelos sensores, como o método InSar e fotogrametria.

Em pesquisas futuras sugere-se a aplicação de técnicas de simulação, onde se confrontariam dados amostrais desses modelos com dados reais, variando-se o tamanho da amostra (que implica no custo da análise de campo. Nessas pesquisas seriam gerados gráficos de curvas operacionais considerando-se os riscos do usuário e os riscos do produtor. Isto é, qual o risco de se obter um produto ruim com uma amostra muito pequena (risco do usuário) e qual o risco de se obter um produto bom com uma amostragem de alto custo e super abundante (risco do produtor).

Vale ainda ressaltar que essa mesma pesquisa pode servir de referência para a análise de novos produtos que venham a ser disponibilizados e de fácil acesso para os usuários finais.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Pesquisa & Desenvolvimento da Agência Nacional de Energia Elétrica (CEMIG-ANEEL GT-599) e Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES (Código 001). HCL possui bolsa de mestrado da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais. DRM possui Bolsa de Produtividade CNPq (309763-2020-7).

Referências

- Apeh, O. I., Uzodinma, V. N., Ebinne, E. S., Moka, E. C., Onah, E. U. (2019). Accuracy Assessment of Alos W3d30, Aster Gdem and Srtm30 Dem: A Case Study of Nigeria, West Africa. *Journal of Geographic Information System*, 11(2), 111-123.
- Alganci, U., Besol, B., Sertel, E., 2018. Accuracy assessment of different digital surface models. *ISPRS In. J. Geo Inf.* 7 (3), 114. <https://doi.org/10.3390/ijgi7030114>.
- Andrade, I.R.A. O Uso de Técnicas de Sensoriamento Remoto na Identificação de Formas na Região de Porto Rico, Planície de Inundação do Alto Rio Paraná, MS/PR. 73p. 2008. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Maringá, MARINGÁ, PR. 2008.
- Balzter, H., Rowland, C.S., Saich, P., 2007. Forest canopy height and carbon estimation at Monks Wood National Nature Reserve, UK, using dual-wavelength SAR interferometry. *Remote Sens. Environ.* 108, 224–239.
- Blitzkow, D., Matos, A. C. O. C., Guimarães, G. N., Pacino, M. C., Lauría, E. A., Nunes, M., ... Hernandez, J. N. (2015). Estudios de gravedad y del modelo de cuasi-geoide para la América del Sur. In Simposio Sirgas.
- Carmo, A. M., Souto, M. V. S., Duarte, C. R. (2015). Análise qualitativa e comparativa das variáveis morfométricas da região serrana da porção sul do maciço central do Ceará geradas através dos MDE: SRTM, ASTER GDEM E TOPODATA. *Revista Brasileira de Cartografia*, 67(3).
- Celestino, V. S., Philips, J. W. (2016) 'Avaliação altimétrica SRTM e ASTER GDEM em áreas de relevos diferenciados', *Revista Brasileira de Cartografia*, 68, pp. 15-42.
- Chagas, C.S.; Fernandes Filho, E.I.; Rocha, M.F.; Carvalho Júnior, W. & Souza Neto, N.C. 2010. Avaliação de modelos digitais de elevação para aplicação em um mapeamento digital de solos. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14: 218-226.
- De Souza, J. O. P. (2015). Análise da precisão altimétrica dos modelos digitais de elevação para área semiárida do nordeste brasileiro. *Revista do Departamento de Geografia*, 30, 56-64.
- DSG - Diretoria do Serviço Geográfico do Exército. "Especificação Técnica para Produtos de Conjuntos de Dados Geoespaciais (ET-PCDG)." 1. Ed., 2. Rev. Brasília, DF, 2015.
- Ferreira, G. D. F. (2014). Emprego de simulação no controle de qualidade em cartografia aplicado a modelos digitais de superfícies oriundos de sensores orbitais segundo PEC-PCD (Master's thesis, Universidade Federal de Pernambuco).
- Ferreira, F.A.C.; Leite, E.S.; Freitas, L.C. & Virgens, A.P. 2017. Potencial de krigagem em modelos digitais de elevação para o planejamento da colheita. <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/10738>
- Florinsky, I.V., Skrypitsyna, T.N., Luschikova, O.S., 2018. Comparative accuracy of the AW3d30 DSM, ASTER GDEM, and SRTM1 DEM: a case study on the Zaoksky testing ground, Central European Russia. *Remote Sens. Lett.* 9 (7), 706–714. <https://doi.org/10.1080/2150704X.2018.1468098>.
- Glennie, C.L., Carter, W.E., Shrestha, R.L., Dietrich, W.E., 2013. Geodetic imaging with airborne LiDAR: the Earth's surface revealed. *Rep. Prog. Phys.* 76 (8), 086801. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/76/8/086801>.
- Grohmann, C.H.; Riccomini, C. & Steiner, S.S. 2008. Aplicações dos modelos de elevação SRTM em geomorfologia. *Revista Geográfica Acadêmica*, 2(2): 73-83.

- Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística (IBGE). O novo modelo de ondulação geoidal do Brasil MAPGEO2015. Relatórios de desenvolvimento do MAPGEO2015, 17 p., 2015. Disponível em: ftp://geoftp.ibge.gov.br/modelos_digitais_de_superficie/modelo_de_ondulacao_geoidal/cartograma/rel_mapgeo2015.pdf. Acesso em: 12 dez. 2016.
- Lousada, G., Fernandes, M. (2017). Avaliação da precisão vertical de modelos digitais de elevação e análise de tendência em diferentes domínios geomorfológicos. *Revista Brasileira de Cartografia*, 69(7).
- Marotta, G. S., Cicerelli, R. E., Barbosa, V. R. F., Almeida, T., Rodrigues, S. W. P. (2020). ALOS PRISM (AW3D05 STANDARD) and Sentinel-1: Evaluation of New Sources of Digital Elevations Models. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v.13 (05).
- Matos, A. C. O. C., Blitzkow, D., Machado, W. C., Nunes, M. A., Lengruber, N. V., Xavier, E. M. L., & Fortes, L. P. S. (2016). Mapgeo2015: O novo modelo de ondulação geoidal do Brasil. *Revista Brasileira de Cartografia*, 68(10).
- Mesa-Mingorance, J. L., & Ariza-López, F. J. (2020). Accuracy Assessment of Digital Elevation Models (DEMs): A Critical Review of Practices of the Past Three Decades. *Remote Sensing*, 12(16), 2630.
- Morais, J. D. (2017). Avaliação de modelos digitais de elevação provenientes de dados de sensoriamento remoto de distribuição gratuita. <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/handle/1843/IGCM-AQPMTM>
- Mudd, S. M. (2020). Topographic data from satellites. In *Developments in Earth Surface Processes* (Vol. 23, pp. 91-128). Elsevier.
- Nero, M. A. Propostas para o controle de qualidade de bases cartográficas com ênfase na componente posicional. 2005. Tese (Doutorado). São Paulo: LTG/PTR/EPUSP, 2005.
- Purinton, B., & Bookhagen, B. (2017). Elevation validation and geomorphic metric comparison with focus on ASTER GDEM2, SRTM-C, ALOS World 3D, and TanDEM-X. *EGUGA*, 4510.
- Tang, F.-A.; Strobl, J.; Gong, J.-Y.; Zhao, M.-D.; Chan, Z.-J. Evaluation on the accuracy of digital elevation models. *J. Geogr. Sci.* 2001, 11, 209–216.
- Teruya Junior, H.; Lastoria, G.; Paranhos Filho, A.C.; Dalmas, F.B. & Correa, L.C. 2016. Mapeamento das APP's de hidrografia e declividade como subsídio a gestão da bacia hidrografia do Rio Formoso (Mato Grosso do Sul). *Revista Geociências*, 15(2): 128-140.
- Toutin, T., 2001. Elevation modelling from satellite visible and infrared (VIR) data. *Int. J. Remote Sens.* 22 (6), 1097–1125. <https://doi.org/10.1080/01431160117862>.
- USGS, 2005. Shuttle Radar Topography Mission: Quick Facts, URL: <http://srtm.usgs.gov/Mission/quickfacts.html>, (last date accessed: 09 December 2005).
- Valeriano, M. M.; Rossetti, D. F. (2012). Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. *Applied Geography*, 32(2), 0–309. doi:10.1016/j.apgeog.2011.05.004.
- Viel, J. A., da Rosa, K. K., & Junior, C. W. M. (2020). Avaliação da Acurácia Vertical dos Modelos Digitais de Elevação SRTM, ALOS World 3D e ASTER GDEM: Um Estudo de Caso no Vale dos Vinhedos, RS–Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 13(05), 2255-2268.
- Yap, L., Kand_e, L.H., Nouayou, R., Kamguia, J., Ngouh, N.A., Makuate, M.B., 2018. Vertical accuracy evaluation of freely available latest high-resolution

(30 m) global digital elevation models over Cameroon (Central Africa) with GPS/leveling ground control points. *Int. J. Digital Earth* 12, 1–25. <https://doi.org/10.1080/17538947.2018.1458163>.

Rosa, R, do Carmo Lima, S. Assunção W.L. (1991). Abordagem preliminar das condições climáticas de Uberlândia (MG). *Sociedade & Natureza*, 3 (5).

Crippen, R.E., Buckley, S., Agram, P.S., Belz, J.E., Gurrola, E.M., Hensley, S., Kobrick, M., Lavallo, M., Martin, J.M., Neumann, M., Nguyen, Q. (2016). NASADEM global elevation model of earth: Methods for the refinement and merger of SRTM and ASTER GDEM. In AGU Fall Meeting Abstracts 2016 Dec.