AVALIAÇÃO DE MDES DE RESOLUÇÃO ESPACIAL MODERADA NO NORTE DA AMAZÔNIA

Fabio Corrêa Alves [1], *Márcio de Morisson Valeriano*[1]

[1]Divisão de Observação da Terra e Geoinformática, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Caixa Postal 515 - 12.227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil. alves.fabioc@gmail.com, marcio.valeriano@inpe.br

RESUMO

A disponibilidade recente de novas versões de modelos digitais de elevação (MDEs) requer novos estudos visando avaliar a qualidade desses modelos em contextos topográficos diversos. O objetivo do trabalho foi realizar uma avaliação de quatro MDEs globais de resolução espacial de 30 m (SRTM, NASADEM, AW3D30 e Copernicus) em topografia plana e montanhosa no norte da Amazônia, com dados do *Light Detection and Ranging* (LIDAR) espacial da missão *Global Ecosystem Dynamics Investigation* (GEDI) usados como referência. Os MDEs interferométricos apresentaram os valores mais baixos das métricas de erro estudadas, raiz quadrada do erro médio – RMSE (média = 4,4) e erro médio absoluto – MAE (média = 2,6). O MDE Copernicus revelou maior detalhamento de canais fluviais em mapas 3D e curvas de elevação menos ruidosas em perfis topográficos, que seguem a morfologia do terreno, com grande potencial de uso em pesquisas topográficas na Amazônia.

Palavras-chave **–** Superfície topográfica, LIDAR espacial, GEDI, métricas de erro, bacia do rio Branco.

ABSTRACT

The recent availability of new versions of digital elevation models (DEMs) requires new studies to assess the quality of these models in diverse topographic contexts. The aim of this study was to carry out an assessment of four global 30 m spatial resolution DEMs (SRTM, NASADEM, AW3D30, and Copernicus) in flat and mountainous topography in northern Amazonia, with the space Light Detection and Ranging (LIDAR) from Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) as reference data. The interferometric DEMs showed the lowest values of studied error metrics, root mean square error – RMSE (average = 4.4) and mean absolute error – MAE (average = 2.6). The Copernicus DEM revealed higher detailing of fluvial channels in 3D maps and less-noised elevation curves in topographic profiles, that follow the terrain morphology, with great potential of use in topographical studies in Amazonia.

Key words **-** *Topographic surface, space LIDAR, GEDI, error metrics, Branco River basin.*

1. INTRODUÇÃO

Modelos Digitais de Elevação (MDEs) têm sido utilizados para uma diversidade de aplicações, incluindo, mas não se limitando a: modelagem do fluxo de água ou movimentos de massa, correção geométrica de imagens de satélite e fotografias aéreas, planejamento de áreas urbanas, extração de lineamentos geológicos, geomorfometria e análise quantitativa da topografia moderna [1,2,3]. Em algumas aplicações, MDEs são a fonte de informação primária para a execução de operações específicas em Sistemas de Informação Geográfica (SIGs), como na extração das redes de drenagem e bacias hidrográficas. Como os resultados destas análises dependem da qualidade das elevações digitais como dados de entrada em SIG, estudos de avaliação são fundamentais para a escolha do MDE.

Atualmente, existe uma grande variedade de MDEs para a análise da superfície terrestre. Exemplos de MDEs gratuitos e de resolução espacial moderada (30 m) incluem, o ASTER GDEM do sensor ASTER/Terra [4] e o AW3D30 do sensor PRISM/ALOS [5], ambos derivados por imagens ópticas de satélite. MDEs gerados por técnicas de interferometria de radar de abertura sintética (inSAR) incluem os da *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) [6] e o NASADEM [7], produzido a partir do reprocessamento dos dados SRTM originais, a fim de corrigir erros e artefatos. Mais recentemente, em dezembro de 2020, a Agência Espacial Europeia (ESA) também lançou uma nova versão de MDE interferométrico, o MDE Copernicus (GLO-30; https://spacedata.copernicus.eu) produzido a partir de uma reamostragem (i.e., de ~ 12 m para 30 m de resolução espacial em escala global) do WorldDEM da missão TanDEM-X. Dada as características de aquisição particulares a cada MDE, é necessário que o potencial das novas versões disponíveis seja avaliado em cenários topográficos diversos.

Uma das formas de se avaliar a qualidade altimétrica de um MDE é através da aplicação de normas oficiais, como a do Padrão de Exatidão Cartográfica para Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD) com o uso de dados altimétricos oficiais do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) [8]. A distribuição de dados altimétricos oficiais, entretanto, é ainda limitada para várias regiões do Brasil, como em áreas amazônicas densamente vegetadas no norte do país. Alternativamente, a oferta de novos sensores orbitais com a coleta de informações altimétricas inclusive, tem permitido a avaliação quantitativa de MDEs a partir da extração de métricas de erro. Este é o caso, por exemplo, do *Light*

Detection and Ranging (LIDAR) espacial da missão *Global Ecosystem Dynamics Investigation* (GEDI) [9], lançado pela NASA em dezembro de 2018, que fornece, entre outros produtos, informações sobre a elevação de superfície do terreno. Porém, devido à disponibilização recente destes dados (i.e., março de 2019) e às subsequentes correções e atualizações (e.g., GEDI versões 1 e 2), eles ainda não foram aplicados com a finalidade de avaliar a qualidade das novas versões de MDEs em cenários topográficos amazônicos. Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar de forma qualitativa e quantitativa quatro MDEs globais de resolução espacial de 30 m (SRTM, NASADEM, AW3D30 e Copernicus) com base nos dados de elevação de superfície do GEDI em uma área de topografia plana e montanhosa no norte da Amazônia. Esta análise foi feita visando fornecer informações que possam subsidiar pesquisas topográficas futuras nesta região.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Área experimental

O foco principal deste estudo é uma área localizada inteiramente no Estado de Roraima, ao norte da bacia do rio Branco, no norte da Amazônia (Fig. 1a). Esta área possui ~ 8.758 km², localizada entre 3°50’ e 4°41’ de latitude norte e entre 61°7’e 60°18 de longitude oeste. O relevo desta área, entre os divisores dos rios Branco-Essequibo no escudo da Guiana é caracterizado por altas elevações, i.e., de até 1.619 m acima do nível do mar (asl) (Fig. 1b). Para sul, o relevo é composto essencialmente de baixas elevações, i.e., < 300 m asl (Fig. 1b).

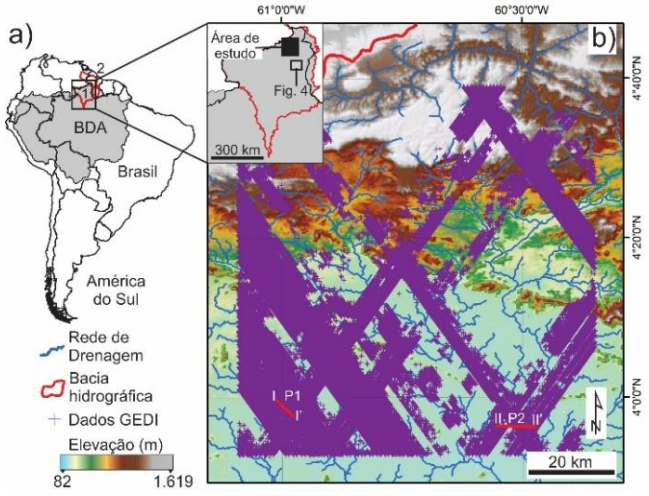


Figura 1. a) Localização da área de estudo ao norte da bacia do rio Branco, no norte da Amazônia. b) Detalhe da topografia e rede de drenagem da área de estudo no MDE Copernicus de 30 m de resolução espacial em paleta de cores. BDA = Bacia do rio Amazonas; 1 = Bacia do rio Branco; 2 = Bacia do rio Essequibo.

2.2. Avaliação da qualidade dos MDEs de resolução espacial moderada

Dentre os MDEs disponíveis gratuitamente e com 30 m de resolução espacial, selecionaram-se para o desenvolvimento da presente análise o SRTM v.3, o NASADEM, que é uma versão aprimorada dos dados SRTM, o ALOS AW3D30 e o Copernicus. Estes MDEs, georreferenciados em coordenadas geográficas, foram baixados da plataforma OpenTopography (https://opentopography.org/).

Basicamente, como etapas de pré-processamento realizaram-se ajustes para corrigir o deslocamento dos pixels entre os MDEs. Como as elevações dos MDEs encontravam-se em diferentes modelos geoidais, inicialmente foi necessária a conversão do sistema de coordenadas ortométricas do MDE Copernicus (modelo EGM2008) para o modelo EGM96 para compatibilização com os demais MDEs. Isto foi feito com base na manipulação dos valores de elevação para cada pixel seguindo a equação 1:

$$H = h - N \quad (1)$$

onde: H é a altitude ortométrica, h refere-se a altitude elipsoidal e N equivale a ondulação geoidal ou altura do geoide. Os dados da ondulação geoidal (modelos EGM96 e EGM2008) em formato matricial foram obtidos do endereço eletrônico https://www.agisoft.com/downloads/geoids/. Uma vez convertidas as altitudes, procedeu-se com a extração de algumas métricas de erro, como a raiz quadrada do erro médio (RMSE) e o erro médio absoluto (MAE) de acordo com as equações 2 e 3:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left(y_j - \hat{y}_j\right)^2} \quad (2)$$

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\left|y_j - \hat{y}_j\right| \quad (3)$$

onde yj representa o valor observado/real (elevação de superfície do terreno) e $\hat{y}j$ o valor estimado (elevação estimada nos MDEs). Quanto menor a diferença entre o valor observado e o estimado, melhor são os resultados preditos pelo modelo. Como referência para os dados de elevação de superfície utilizou-se os dados do LIDAR espacial da missão GEDI [9]. Dentre os objetivos desta missão está o conhecimento do comportamento e estrutura vertical de florestas, principalmente as tropicais, e o seu papel no ciclo do carbono. O GEDI produz informações relativas à altura do topo do dossel, métricas estruturais e elevação de superfície do terreno. O download (https://gedi.umd.edu/) e desdobramento dos produtos GEDI nível 2A versão 2 filtrados apenas para pontos com qualidade alta (*quality flag* = 1) produziu arquivos grandes (~ 83.600 pontos; Fig. 1b)

ocupando espaço considerável em disco (~ 250 GB). A primeira etapa de processamento dos dados GEDI consistiu na conversão dos dados que estão em altitudes elipsoidais para altitudes ortométricas (modelo EGM96) usando a equação 1 para a sua compatibilização com os valores altitudinais dos MDEs. Para evitar uma super amostragem no cálculo das métricas de erro já que os dados GEDI ocorrem distribuídos muito próximos uns dos outros, decidiu-se seguir com a estratégia de extrair apenas os valores médios de elevação, tanto dos dados GEDI como dos MDEs, usando estratos com áreas de 1 km². Essa operação reduziu consideravelmente o número de amostras usadas para esta análise (3.702). O processamento dos dados GEDI foi feito com auxílio do pacote rGEDI implementado em R (https://github.com/carlos-alberto-silva/rGEDI).

Em adição às métricas de erro, a análise da qualidade dos MDEs também incluiu avaliação qualitativa de dois perfis topográficos e de mapas em perspectiva tridimensional (3D) do relevo com auxílio do pacote *rayshader* no R (https://www.rayshader.com/).

3. RESULTADOS

As métricas de erro extraídas com base nas elevações dos quatro MDEs e nos dados de elevação de superfície do GEDI apresentaram pequenas diferenças (Fig. 2). Em geral, resume-se que as métricas RMSE (Fig. 2a) e MAE (Fig. 2b) para três cenários avaliados, isto é, área total, relevos planos a suave-ondulados (elevações de até 300 m asl) e ondulados a montanhosos (elevações > 300 m asl) foram relativamente mais baixas para os MDEs SRTM, NASADEM e Copernicus do que para o MDE AW3D30, cujos valores mais altos representam os piores resultados.

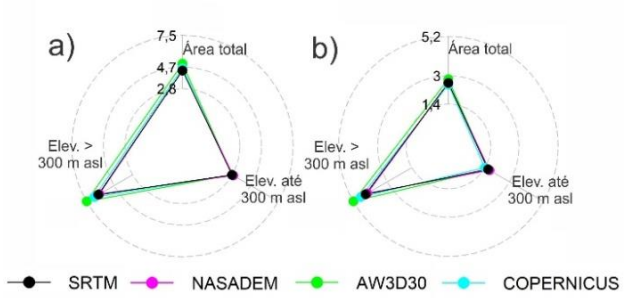


Figura 2. Gráficos polares com os resultados das métricas de erro RMSE (a) e MAE (b) extraídas a partir das elevações dos MDEs (SRTM, NASADEM, AW3D30 e Copernicus) e dados do LIDAR espacial da missão GEDI.

Considerando a totalidade da área de estudo, os MDEs SRTM e NASADEM revelaram os menores valores de RMSE (4,4), enquanto que o Copernicus mostrou o menor valor da métrica MAE (2,5). Em relevos planos, os valores mais baixos de RMSE (2,8) foram encontrados para os MDEs SRTM, AW3D30 e Copernicus. Este último também revelou o menor valor de MAE, de 1,4. Para relevos montanhosos, os menores valores de RMSE e MAE foram encontrados para os MDEs da NASADEM, SRTM e Copernicus (Fig. 2). Nestas áreas, o valor das métricas RMSE e MAE foi de até 2,5 vezes mais alto do que em áreas planas.

O perfil topográfico 1 (P1) em área de relevo montanhoso não revelou grandes diferenças visuais entre as curvas de elevação dos MDEs (Fig. 3). Por outro lado, em área de relevo plano a suave ondulado, as curvas de elevação dos MDEs SRTM e NASADEM foram as mais ruidosas, com maior ocorrência de picos e vales, seguido da curva de elevação do MDE AW3D30 (ver o perfil topográfico 2 - P2 na Fig. 3). A curva de elevação do MDE Copernicus foi a mais suave e menos ruidosa e apresentou maior similaridade com a curva de elevação de superfície dos dados GEDI, seguindo de forma geral a morfologia do terreno (Fig. 3).

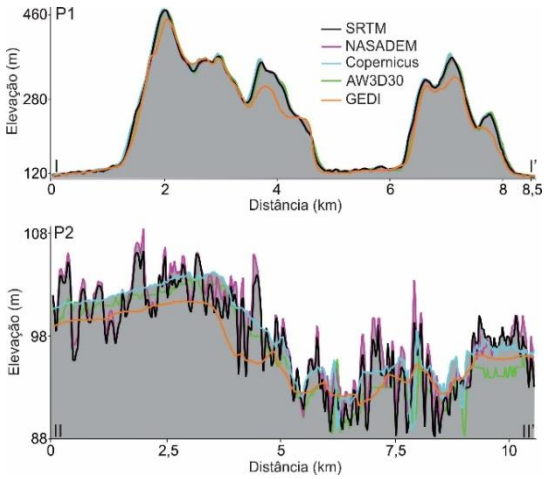


Figura 3. Perfis topográficos produzidos com base nos MDEs (SRTM, NASADEM, AW3D30 e Copernicus) e dados GEDI para relevo montanhoso (a) e plano (b). Ver localização dos perfis topográficos na Fig. 1b.

A análise qualitativa em mapas 3D não revelou diferenças significativas entre os quatro MDEs em áreas de relevos montanhosos. A perspectiva em 3D de relevo essencialmente plano é apresentada na Fig. 4.

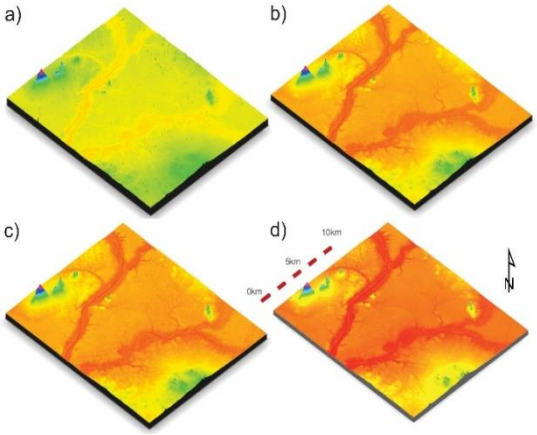


Figura 4. Representações 3D em relevo sombreado (exagero vertical de 2×) dos MDEs avaliados para uma área de relevo plano (ver localização da área na fig. 1a). MDEs: a) AW3D30; b) SRTM; c) NASADEM; e d) Copernicus.

Em áreas planas, com elevações baixas, notou-se maior rugosidade nas feições do relevo no MDE AW3D30, onde é possível observar a presença de vários picos locais que não correspondem à topografia real (Fig. 4a). Os MDEs SRTM e NASADEM também revelaram feições rugosas, embora de menor intensidade se comparadas com as do MDE AW3D30 (Fig. 4b-c). A visualização do relevo em 3D a partir do MDE Copernicus permitiu discriminar diferentes níveis de rugosidade na cena, diferenças que não puderam ser observadas nos demais MDEs, assim como apresentou realce de feições do terreno, como canais de drenagem de diferentes ordens (Fig. 4d).

4. DISCUSSÃO

Os resultados obtidos com as métricas RMSE e MAE em áreas amazônicas sugerem que as elevações proveninentes de MDEs interferométricos, como as do SRTM, NASADEM e o Copernicus, tendem a ser mais precisas, principalmente em áreas de topografia plana, dada sua maior semelhança com as elevações de superfície do GEDI. Esses resultados são compatíveis com o fato de que MDEs interferométricos, como os da SRTM e NASADEM [6,7] podem apresentar maior potencial para extrair informação da superfície do que outros MDEs (e.g., AW3D30), já que a banda C tem maior potencial de penetração da onda eletromagnética em áreas tropicais [10], com densa cobertura de nuvens e vegetação, como no caso da área desta pesquisa.

O fato de se obter perfil topográfico com curva de elevação relativamente mais suave para o Copernicus em relação aos demais MDEs pode estar associado ao processo de reamostragem do tamanho de pixel desse MDE, que passou de ~ 12 m (resolução espacial original) para 30 m globalmente, que teria levado a uma maior suavização dos dados de elevação digitais. Estudos recentes em regiões com condições climáticas variadas também apontaram o MDE Copernicus como sendo o MDE mais preciso e de maior qualidade para a representação da superfície topográfica entre outros tipos de MDEs [11].

5. CONCLUSÕES

A avaliação qualitativa e quantitativa de quatro MDEs de resolução espacial de 30 m em dois tipos de relevo no norte da Amazônia revelou que os MDEs interferométricos, como o NASADEM (versão aprimorada da SRTM) e o Copernicus, apresentaram os melhores resultados, com os valores mais baixos nas métricas de erro, principalmente nas áreas planas. O MDE Copernicus revelou curvas de elevação mais suaves e que mais se aproximam das elevações de superfície (referência) do LIDAR espacial da missão GEDI, indicando o seu potencial de uso em pesquisas topográficas de outras áreas tropicais densamente vegetadas da Amazônia.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão de bolsa de pós-doutorado - PDJ (#163159/2020-3) a F.C.A. e de pesquisa (#307943/2019-4) a M.M.V.

7. REFERÊNCIAS

[1] I. D. Moore, R. B. Grayson, and A. R. Ladson. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. Hydrological Processes, v.5, p. 3–30, 1991.

[2] R. J. Pike. The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from digital elevation models. Mathematical Geology, v. 20, p. 491–511, 1988.

[3] M.M. Valeriano, T. M. Kuplich, M. Storino, B. D. Amaral, J. N. Mendes Júnior, and D. J. Lima. Modeling small watersheds in Brazilian Amazonia with shuttle radar topographic mission-90m data. Computers & Geosciences, v. 32, p. 1169-1181, 2006.

[4] M. Abrams, R. Crippen, and H. Fujisada. Aster Global Digital Elevation Model (Gdem) and Aster Global Water Body Dataset (Astwbd). Remote Sensing, v. 12, p. 1-12, 2020.

[5] T. Tadono, H. Ishida, F. Oda, S. Naito, K. Minakawa, and H. Iwamoto. Precise Global DEM Generation by ALOS PRISM. ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci, v. II-4, p. 71–76, 2014.

[6] T. G. Farr, P. A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodriguez, L. Roth, D. Seal, S. Shaffer, J. Shimada, J. Umland, M. Werner, M. Oskin, D. Burbank, and D. Alsdorf. The shuttle radar topography mission, Rev. Geophys, v. 45, p. 1–33, 2007.

[7] R. Crippen, S. Buckley, P. Agram, E. Belz, E. Gurrola, S. Hensley, S., M. Kobrick, M. Lavalle, J. Martin, M. Neumann, Q. Nguyen, P. Rosen, J. Shimada, M. Simard, and W. Tung. Nasadem Global Elevation Model: Methods and Progress. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci, v. XLI-B4, p. 125–128, 2016.

[8] E. H. Cremon, G. M. Bettiol, J. P. M. Júnior, F. C. Macedo, and M. O. Rabelo. Avaliação da altimetria do MDE COP-30 no Centro-Oeste do Brasil. Revista Brasileira de Cartografia, v. 74, p. 536-546, 2022.

[9] D. B. Coyle, P. R. Stysley, D. Poulios, G. B. Clarke, and R. B. Kay. Laser transmitter development for NASA's Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) lidar. In Lidar Remote Sensing for Environmental Monitoring XV. International Society for Optics and Photonics, 961208, p. 1-7, 2015.

[10] F. M. Henderson, and A. J. Lewis. Principles and Applications of Imaging Radar: Manual of remote sensing. New York: John Wiley and Sons, 1998.

[11] B. Purinton, and B. Bookhagen B. Beyond Vertical Point Accuracy: Assessing Inter-pixel Consistency in 30m Global DEMs for the Arid Central Andes. Frontiers in Earth Science, v. 9, p. 1-24, 2021.