

# **Acurácia vertical de modelos digitais de elevação produzidos com diferentes resoluções espaciais, áreas de abrangência e, processos de geração – caso de estudo para o estado do Paraná - BR**

## **Vertical accuracy of digital elevation models produced with different spatial resolutions, coverage areas and generation processes - case study for the Paraná state - BR**

**Tony Vinicius Moreira Sampaio<sup>\*</sup>, Tiago Lima Rodrigues<sup>\*\*</sup>, José Eduardo Gonçalves<sup>\*\*\*</sup>**

<sup>\*</sup>Departamento de Geografia - Universidade Federal do Paraná, e-mail: [tony2sampaio@gmail.com](mailto:tony2sampaio@gmail.com)

<sup>\*\*</sup>Departamento de Geomática - Universidade Federal do Paraná, e-mail: [tiagorodrigues@ufpr.br](mailto:tiagorodrigues@ufpr.br)

<sup>\*\*\*</sup>SIMEPAR - Sistema Meteorológico do Paraná, e-mail: [jose.eduardo@simepar.br](mailto:jose.eduardo@simepar.br)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/raega.v53i0.80054>

### **Resumo**

Modelos digitais do terreno (MDTs), de superfície (MDSs) ou elevação (MDEs) objetivam representar as elevações de uma determinada região. São gerados a partir de diferentes métodos, distintas resoluções espaciais e áreas de abrangência e seus dados são utilizados em projetos de engenharia e estudos ambientais. Este trabalho analisa a acurácia vertical absoluta, geral e por classes de uso, de cinco MDS/MDTs de acesso e uso gratuitos disponíveis para o estado do Paraná. A pesquisa emprega as metodologias propostas pela American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS, 2015) e pela Especificação Técnica para o Controle de Qualidade para Dados Geoespaciais (DSG, 2016). A análise consolidada (global) indicou que o MDS ALOS PALSAR é o mais indicado para projetos a serem desenvolvidos no Paraná que empreguem diferentes classes de uso. Já em áreas de vegetação, os modelos ALOS PALSAR e o MDT LAGEO devem ser priorizados. Para projetos a serem desenvolvidos em áreas abertas e não vegetadas, indica-se o uso do MDS ALOS PALSAR e, em áreas urbanas, recomenda-se o uso do MDS AW3D30. A pesquisa mostrou que a escolha de um modelo em detrimento de outro pode implicar em divergências de acurácia da ordem de até 10m e, que as diferentes classes de uso podem apresentar padrões de qualidade significativamente distintos. Ainda, que modelos regionais construídos a partir de processos de interpolação apresentam potencial para obtenção de resultados superiores aos observados nos modelos globais gratuitos. Por fim, a pesquisa revelou que a maior parte dos valores dos conjuntos de discrepância altimétrica observados não apresentaram distribuição normal, indicando que o parâmetro estatístico percentil 95 proposto pela ASPRS se mostrou mais adequado como indicativo de acurácia.

**Palavras-chave:** REQM, Qualidade, Distribuição normal de erros altimétricos

### Abstract

Digital terrain (MDTs), surface (MDSs) or elevation (MDEs) models aim to represent the elevations of a given region. They are generated from different methods, different spatial resolutions and areas of coverage, and their data are used in engineering projects and environmental studies. This paper analyzes the absolute vertical accuracy, general and by class of use, of five MDS / MDTs of free access and use available for the state of Paraná. The research uses the methodologies proposed by the American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS, 2015) and, by the Technical Specification for Quality Control for Geospatial Data (DSG, 2016). The consolidated (global) analysis indicated that MDS ALOS PALSAR is the most suitable for projects that employ different classes of use in Paraná. In areas of vegetation, the ALOS PALSAR and MDT LAGEO models should be prioritized. For projects to be developed in open and non-vegetated areas, the use of MDS ALOS PALSAR is recommended and, in urban areas, the use of MDS AW3D30 is recommended. Research has shown that the choice of one model over another may result in differences in accuracy of up to 10m and that the different classes of use may have significantly different quality standards. Still, that regional models built from interpolation processes have the potential to obtain results that are superior to those observed in the free global models. Finally, the research revealed that most of the values of the altimetric discrepancy sets observed did not present a normal distribution, indicating that the 95th percentile statistical parameter proposed by ASPRS proved to be more adequate as an indicator of accuracy.

**Keywords:** RMSE, Quality, Normal distribution of altimetric errors

## I. INTRODUÇÃO

Modelos digitais de terreno (MDTs), de superfície (MDSs) ou de elevação (MDEs) objetivam representar as elevações de uma determinada região (DOYLE, 1978; FELGUEIRAS, 2001; MOORE et al., 1991). Os MDTs diferem dos MDSs por representarem somente as feições do solo e suas formas, excluindo a vegetação e alvos antrópicos sobrepostos (EL-SHEIMY, 2005; PRIESTNALL et al., 2000).

Os MDSs/MDTs podem ser gerados a partir de diferentes métodos, com distintas resoluções espaciais e áreas de abrangência. No que se refere aos métodos de geração, destacam-se os processos de interpolação de dados altimétricos pré-existentes (LI et al, 2005), o-LIDAR (*Light Detection and Ranging*) e o RADAR (*Radio Detection and Ranging*) (CASAS et al., 2006; DOYLE, 1978; WEIBEL E HELLER, 1993) e os processos de mensuração da elevação por estereoscopia/paralaxe óptica (COLLINS, 1970; GIROD et al., 2017; TOUTIN, 2000).

Em relação à cobertura espacial, os MDSs/MDTs podem ser de larga abrangência ou regionais/locais. Modelos de larga abrangência espacial (globais ou quase globais) são normalmente gerados a partir de dados

obtidos por sensores embarcados em plataformas orbitais, podendo ser ativos, quando emitem a própria fonte de energia, ou passivos, quando usam o sol como fonte de energia.

Modelos regionais e locais podem usar dados provenientes de varredura LIDAR (terrestre ou aerotransportada), interferometria RADAR (orbital ou aerotransportado), processos de interpolação (via uso de pontos cotados e/ou curvas de nível) e estereoscopia/paralaxe óptica a partir de imagens coletadas por sensores/câmeras embarcadas em plataformas aéreas.

Alguns dos MDSs de abrangência global/quase-global são sistematicamente tratados, compilados e disponibilizados gratuitamente a usuários mediante cadastro. É importante mencionar que, apesar de frequentemente estes produtos serem nominados como MDTs (BOULTON; STOKES, 2018; VALERIANO, 2004), a maioria dos modelos globais são na verdade MDSs, pois apresentam as elevações associadas aos elementos presentes no terreno, naturais ou artificiais.

No âmbito regional, para todo o estado do Paraná, pode ser citado um MDT construído pelo Laboratório de Pesquisas Aplicadas em Geomorfologia e Geotecnologias (LAGEO) da Universidade Federal do Paraná (UFPR) (disponibilizado sob demanda). Neste caso, usuários do estado do Paraná contam com tais opções gratuitas para obtenção de informações espaciais altimétricas para diversos fins.

É importante mencionar que dados altimétricos provenientes de MDSs/MDTs são utilizados como base para projetos de engenharia e estudos ambientais (HANIEF; LAURSEN, 2019; MCBRATNEY; MENDONÇA SANTOS; MINASNY, 2003), bem como para obtenção de parâmetros morfométricos (FONSECA; AUGUSTIN, 2014; MELO et al., 2010). Neste contexto, valores altimétricos inconsistentes podem alterar de forma significativa os resultados das análises e parâmetros morfométricos derivados, como a declividade e a curvatura do terreno, podendo trazer prejuízos aos projetos. Assim, os MDSs/MDTs devem ser avaliados antes de serem postos em uso, a fim de estimar sua qualidade e adequação aos fins a que se destinam (UYVAL; TOPRAK; POLAT, 2015; YAMAZAKI et al., 2017). Esta análise de adequabilidade (*fitness for use*) é importante para auxiliar os usuários na escolha dos melhores modelos para cada finalidade de uso e para o conhecimento dos erros e limitações presentes nos mesmos.

A análise da qualidade e consistência de um MDS/MDT requer diferentes procedimentos, sendo a avaliação absoluta da acurácia vertical o procedimento inicial. Porém, modelos podem apresentar, ainda, características como a presença de valores altimétricos espúrios não detectáveis na análise inicial, tendências (EINER; KRIEGER; ROTH, 2006) e desempenho variável em relação às classes de uso da terra (ex.: urbano,

vegetação esparsa ou densa). Grosso modo, a análise da acurácia altimétrica é realizada a partir do cálculo de parâmetros estatísticos em função dos resultados da comparação dos valores altimétricos observados *in loco* (obtidos com precisão altimétrica no mínimo três vezes superior à estimada para os modelos), com os valores observados no modelo (ASPRS, 2015; DSG, 2016). Esta divergência de valores é denominada neste trabalho como discrepância altimétrica.

No Brasil, a avaliação da qualidade altimétrica de modelos digitais de elevação foi proposta pela Especificação Técnica para Controle de Qualidade de Dados Geoespaciais (ET-CQDG, 2016). Conforme a ET-CQDG (DSG, 2016), a análise utiliza "... o mesmo procedimento de cálculo previsto na legislação", Decreto 89.817/84, o qual define o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) como um "indicador estatístico de dispersão, relativo a 90% de probabilidade" (grifo nosso), obtido a partir da multiplicação do Erro-Padrão (EP) por 1,6449 ( $PEC = 1,6449 * EP$ ). Conforme o Decreto, Erro Padrão e Erro Médio Quadrático (EMQ) são equivalentes.

É importante destacar que a adoção de indicador estatístico para caracterização da acurácia pressupõe existência de distribuição normal nos erros. Conforme o *Federal Geographic Data Committee* (FGDC, 1998), o padrão definido inicialmente pelo *U.S. Bureau of the Budget*, em 1941, para a NMAS (*National Map Accuracy Standards*), definia que: "se o erro vertical apresenta distribuição normal, o fator 1,6449 é aplicado para computar a acurácia vertical com 90% de nível de confiança" (grifo nosso) (valor adotado pelo Decreto 89.817/84). Já o atual padrão definido pela *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* (ASPRS, 2015), também pressupõe distribuição normal e emprega nível de confiança de 95% ( $RMSE * 1,96$ ).

Conforme Sampaio e Brandalize (2018), a pressuposição de distribuição normal e aplicação de nível de confiança sobre o valor de RMSE (*Root Mean Square Error*), é a forma mais utilizada em normas internacionais para inferir acurácia posicional bi e tridimensional (FGDC, 1998; ASPRS, 2015). Cabe destacar que a ET-CQDG (DSG, 2016) emprega o termo EQM (EQMH - Erro Médio Quadrático Horizontal e EQMZ - Erro Médio Quadrático Vertical), em lugar de RMSE ou REQM (Raiz do Erro Quadrático Médio).

A fim de avaliar de forma mais detalhada os MDTs/MDSs, a ASPRS (2015) propõe, ainda, a caracterização da qualidade por classes de usos (terreno aberto, áreas urbanas, vegetação de baixo porte, vegetação esparsa e vegetação densa) e emprega novos parâmetros estatísticos, como o percentil 95 para análise consolidada dos dados e da acurácia vertical de áreas com vegetação.

Apesar dos MDSs globais gratuitos terem seus padrões de qualidade posicional definidos por seus fornecedores (SANTILLAN; MAKINANO-SANTILLAN, 2016), a acurácia altimétrica pode variar significativamente

de local para local (BOULTON; STOKES, 2018) e de modelo para modelo (ROKNI; AHMAD; HAZINI, 2015) em função dos diferentes métodos de aquisição, equipamentos e resolução espacial. Outra questão relevante é o nível de mistura, processos de filtragem e reamostragem (OUERGHI et al., 2015), os quais objetivam alterar a resolução espacial nativa, preencher vazios, corrigir dados espúrios ou modelar o terreno propriamente dito.

Diante de todo o exposto, neste trabalho foi realizada a análise da acurácia vertical absoluta de cinco MDSs/MDTs de acesso e uso gratuitos disponíveis para o estado do Paraná, a saber: SRTM GL1 v3, ALOS PALSAR, ALOS PRISM, ASTER GDEM v3 e MDT LAGEO. A análise empregou as metodologias propostas pela ASPRS (2015) e ET-CQDG (DSG, 2016).

## II. MATERIAIS E MÉTODOS

### Área de Estudo

Para a avaliação dos MDTs/MDSs, foi definido como área de estudo o estado do Paraná, com dois recortes espaciais. O primeiro corresponde ao limite do próprio Estado e o segundo se estende do litoral até proximidades do município de Ponta Grossa (figura 1). O recorte menor (área do recorte 2) representa uma área delimitada pelo retângulo envolvente definido pelo canto mais ao norte e oeste com coordenadas geodésicas  $\phi = -25^{\circ}03'20''$  e  $\lambda = -50^{\circ}22'27''$ ; e pelo canto inferior direito com coordenadas geodésicas  $\phi = -25^{\circ}58'52''$  e  $\lambda = -48^{\circ}13'09''$ , para a qual foram utilizados pontos levantados diretamente em campo e dados de outras fontes. Dentro de toda a área de estudo foram distribuídos pontos de verificação com coordenadas altimétricas conhecidas em áreas urbanas, terrenos abertos e em áreas de vegetação densa e esparsa.

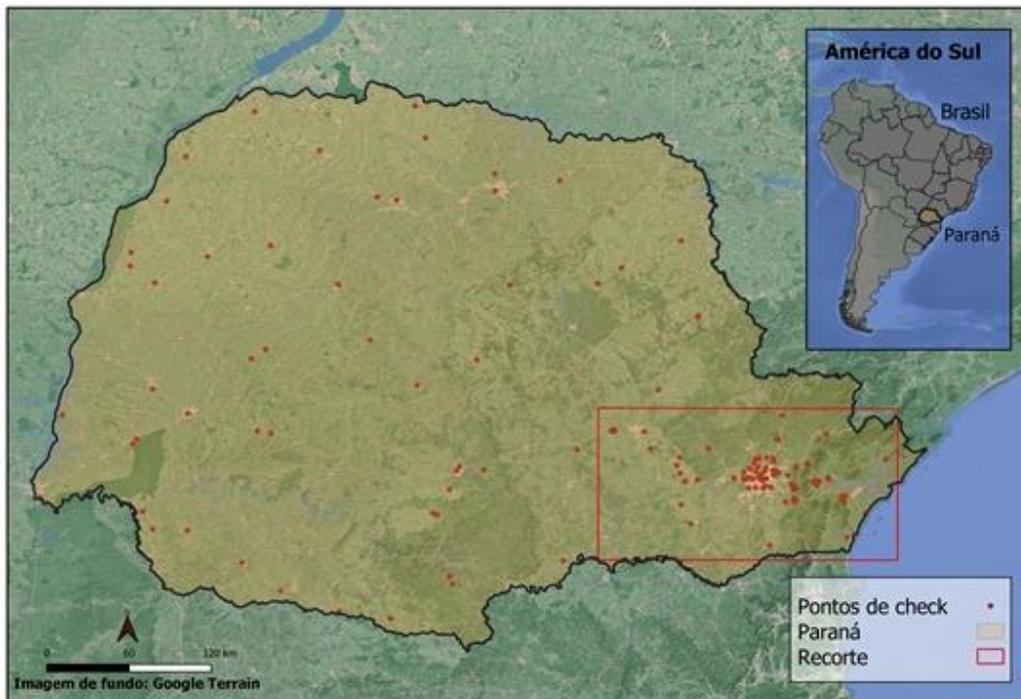


Figura 1 – Área de estudo com a distribuição dos pontos de verificação.

### Caracterização dos pontos de verificação

A fim de avaliar as acurácias altimétricas dos modelos, coordenadas de 165 pontos de verificação foram obtidas. Dentro deste contexto, foram utilizados pontos provenientes de diferentes fontes, a saber: coleta direta via levantamento GNSS em campo, vértices do tipo GPS do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), vértices da Rede de Referência Cadastral do Município de Curitiba (RRCMC) desenvolvida pelo Instituto de Pesquisa e Planejamento Urbano de Curitiba (IPPUC) e vértices da Rede Topográfica (RT) da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

Com relação aos dados provenientes de levantamento GNSS em campo, 62 pontos foram obtidos para área do recorte 2, utilizando-se receptores geodésicos, pertencentes à UFPR. O método e a técnica de posicionamento utilizados foi o relativo estático rápido, com modos pós-processados e em tempo real (IBGE-NTRIP). O tempo de ocupação foi definido de acordo com INCRA (2013). Na figura 2 é apresentado um exemplo de levantamento GNSS em campo. Ao todo, foram realizadas oito campanhas de levantamento em campo, nos dias 25/05/2020, 30/05/2020, 18/06/2020, 19/06/2020, 16/07/2020, 19/06/2020, 14/09/2020 e 16/10/2020. Para o processamento dos dados levantados, o aplicativo gratuito RTKLIB v2.4.2 foi utilizado. Nos casos de linhas de base maiores que 20 km, a observável combinada livre de ionosfera foi utilizada. Para a modelagem da correção troposférica, o modelo de Saastamoinen foi utilizado. Em todos os casos, efemérides precisas foram

aplicadas, juntamente com correção de centro de fase das antenas transmissoras nos satélites e receptoras, marés terrestres e carga oceânica, movimento do Polo e carga oceânica de maré. Todas as coordenadas levantadas apresentam precisão abaixo de 0,50m.



Figura 2 - Exemplos de pontos levantados diretamente em campo com receptores GNSS.

Para o caso dos vértices GPS do SGB/IBGE, RRCMC/IPPUC e RT/UFPR, as coordenadas foram obtidas a partir das monografias disponíveis nos sítios eletrônicos das instituições responsáveis. Ao todo, 103 pontos foram utilizados juntando as três fontes. As precisões das coordenadas destes pontos encontram-se na ordem do centímetro, todas abaixo de 0,50m. O Sistema de Referência Topográfica (SRT) adotado para todos os 165 pontos foi o SGB/SIRGAS 2000. Todos os pontos apresentam acurácia 3x superior à dos modelos testados, podendo ser utilizados para a avaliação de acurácia, conforme estabelecido pela ET-CQDG (DSG, 2016).

Após a obtenção das altitudes elipsoidais de todos os pontos, utilizando o sítio eletrônico do *International Centre for Global Earth Models* (ICGEM), as alturas geoidais provenientes do modelo geopotencial global (MGG) EGM96 foram obtidas. Posteriormente, as altitudes ortométricas referenciadas ao Sistema de Referência Vertical (SRV) EGM96 foram calculadas. Isso em virtude das altitudes ortométricas dos MDSs provenientes do SRTMGL1 v3, ALOS PRISM e ASTER GDEM v3 estarem referenciadas ao SRV EGM96. Em seguida, as discrepâncias entre as altitudes ortométricas dos pontos de verificação e as obtidas nos MDSs foram calculadas.

Com relação ao MDT LAGEO, tem-se a diferença nos referenciais altimétricos. Isto em função da posição altimétrica do Datum Vertical Brasileiro Imbituba-SC (DVBI) não coincidir com a superfície equipotencial do campo da gravidade de origem do MGG EGM96. Desta forma, neste trabalho, foi calculado um parâmetro de

translação vertical ( $\Delta_{SRV}$ ) para a transformação entre os SRVs, utilizando a forma simples de cálculo utilizada, por exemplo, por Montecino (2011) e Sanchez e Freitas (2016):

$$\Delta_{SRV} = \frac{\sum_{i=1}^k (h_i - H_{DVBI_i}^N - \zeta_{MGG_i})}{k} \quad (1)$$

onde  $k$  é o número de pontos utilizados como amostra para o cálculo do parâmetro,  $h_i$  é a altitude elipsoidal do  $i$ -ésimo ponto, referenciado ao SIRGAS2000;  $H_{DVBI_i}^N$  é a altitude normal do  $i$ -ésimo ponto da amostra, no caso do Paraná referenciada ao DVBI e;  $\zeta_{MGG_i}$  é a anomalia de altitude do  $i$ -ésimo ponto extraída do MGG EGM96. Cabe ressaltar, que o uso de anomalias de altitude e altitudes normais na Equação (1) é por conta da adoção do Sistema de Altitudes Normais na componente altimétrica do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB) (IBGE, 2019). Os pontos utilizados foram todas as estações SGB de conexões GPS/RN no estado do Paraná, ao todo 54 pontos. Os valores de  $h$  e  $H^N$  foram retirados diretamente das monografias disponíveis. Os valores de  $\zeta_{MGG_i}$  foram obtidos utilizando o sítio eletrônico do ICGEM, para o Elipsoide GRS80, no Sistema de maré média e considerando o termo de grau zero. Antes da aplicação da Equação (1), as compatibilizações de Sistemas de Maré foram realizadas, adotando-se o Sistema de maré média também para os valores de  $h_i$ , originalmente em Sistema livre de maré. Após todo o procedimento de cálculo, chegou-se a um valor de 0,204 m. Tendo em vista que este valor é menor do que o valor da equidistância das curvas de nível adotada nas cartas 1:50000 do MSB, isto é, 10m, a diferença entre referenciais verticais pode ser desconsiderada sem prejuízo neste caso. Desta forma, para a avaliação do MDT LAGEO UFPR, utilizou-se o conjunto de discrepâncias também em relação às altitudes dos pontos de verificação no SRV EGM96.

A fim de possibilitar as análises de acurácia em áreas vegetadas e não vegetadas, dos 165 pontos de verificação, 45 foram obtidos em área de vegetação esparsa, 52 em área de vegetação densa, 48 em áreas urbanas e 20 em áreas de terreno aberto, atendendo ao mínimo de 20 pontos para cada classe, estabelecido pela ASPRS (2015).

### **Análise da acurácia vertical**

A análise da acurácia vertical foi feita utilizando os procedimentos propostos pela ET-CQDG (DSG, 2016) e pela ASPRS (ASPRS, 2015). De acordo com a ET-CQDG, o cálculo da acurácia para a componente altimétrica

(EQMZ) é feito a partir do universo de discrepâncias altimétricas. Para o caso de uma componente altimétrica qualquer  $Z$  tem-se:

$$REQM_Z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Z_{obs} - Z_{ref})^2}{n}} \quad (2)$$

onde  $n$  é o número de amostras de discrepâncias altimétricas,  $Z_{obs}$  o valor de componente altimétrica observado e  $Z_{ref}$  o valor de componente altimétrica de referência. As classes finais de qualidade foram referenciadas em relação à classe A da Norma (mais rígida em termos de qualidade).

A caracterização da acurácia altimétrica dos modelos, segundo a ASPRS (2015), foi feita a partir dos valores de VVA, NVA e CVA (*Vertical Vegetated Accuracy*, *Non-Vegetated Accuracy* e *Consolidated Vertical Accuracy*). A pesquisa agregou as classes de uso com vegetação (VVA): cultura de baixo porte, vegetação esparsa e vegetação densa, em uma classe única. O não detalhamento da classe de vegetação resulta da dificuldade de correspondência de valores altimétricos em função da divergência entre a data de obtenção dos dados de referência e a de geração dos modelos. Segundo a ASPRS (2015), o VVA emprega o parâmetro estatístico percentil 95 (calculado sobre os valores absolutos das discrepâncias altimétricas), uma vez que considera que nestas áreas as discrepâncias não seguem distribuição normal.

O NVA foi aplicado para análise de duas classes de uso (áreas urbanas e terrenos abertos), via cálculo do REQM com 95% de nível de confiança ( $REQM * 1,96$ ). O CVA, ou, análise consolidada, foi feito para análise conjunta das classes de uso via percentil 95 uma vez que, de acordo com a ASPRS (2015), também neste caso, pressupõe-se a não existência de normalidade. O percentil 95 é um parâmetro estatístico que indica que em 95% das vezes os valores de uma determinada variável são menores ou iguais ao valor determinado.

Para validar o uso do REQM e do percentil 95, as normalidades dos conjuntos amostrais de discrepâncias altimétricas foram verificadas em todos os modelos, via teste de normalidade de Shapiro-Wilk com 95% de nível de confiança.

## Breve descrição dos modelos analisados

### SRTM GL1

O SRTM emprega a interferometria RADAR nas bandas X e C, sendo os dados da banda C distribuídos gratuitamente, em escala global. Apresenta diferentes versões com distintos níveis de filtragem, mistura e

resoluções espaciais. A acurácia vertical do SRTM foi validada em escala global na ordem de 10m para a Ásia, Austrália e América do Norte e, para Ásia, Europa e América do Sul, na ordem de 11,5 m (MUKUL et al., 2015).

### **ALOS PALSAR**

O MDS ALOS PALSAR (interferométrico) é distribuído com correção geométrica e radiométrica, com resoluções espaciais de 30 m e 12,5 m. O sensor PALSAR possui cinco modos típicos de operação: feixe fino único (FBS —*Fine Beam Single*), feixe fino duplo (FBD —*Fine Beam Dual*), transmissão direta (DSN), ScanSAR (SCAN) e polarimétrico (PLR). Os resultados de calibração geométrica e radiométrica do PALSAR, utilizando um total de 500 pontos de verificação coletados em todo o mundo, indicaram uma acurácia geométrica de 9,3 m para os modos FBS, FBD, DSN e POL e cerca de 70 m para o modo ScanSAR (SHIMADA et al., 2010).

### **ALOS PRISM**

O MDS obtido com o sensor PRISM (estereoscopia/paralaxe óptica) denominado de ALOS AW3D30 apresenta cobertura quase-global. O sensor PRISM é um radiômetro pancromático que opera no campo de infravermelho próximo e apresenta três câmeras com visadas à ré, nadir e vante, espaçadas angularmente em aproximadamente 27,5°, com o objetivo de permitir a geração de imagens com sobreposições ao longo da órbita (*along track*) e de MDSs. A resolução espacial em cada câmera é de aproximadamente 2,5m.

Apresenta diferentes versões com implementações de melhorias, principalmente na questão dos vazios. O MDS de 30 m de resolução foi obtido por reamostragem do produto de 5m. O produto apresenta acurácia altimétrica média de 5m, conforme dados da JAXA (TADONO et al., 2016).

### **ASTER *Global Digital Elevation Model* (GDEM) Versão 3 (ASTGTM)**

O MDS global ASTER GDEM (*ASTER Global Digital Elevation Model*) utiliza imagens adquiridas pelo sensor VNIR (*Very Near InfraRed*, com duas câmeras independentes nas bandas 3N (visualização nadir) e 3B (visualização à ré) (estereoscopia/paralaxe ótica).

Apresenta diferentes versões, sendo a versão 3 (ASTGTM) com remoção de valores residuais e outliers e preenchimento com dados de vários MDEs de referência existentes. Embora a versão 3 ofereça melhorias, a LP DAAC adverte que o modelo pode conter anomalias e artefatos que podem reduzir sua usabilidade. Segundo Tachikawa (2011) o modelo apresenta uma acurácia planialtimétrica melhor do que 25 metros.

### **MDT – LAGEO**

Desenvolvido pelo LAGEO-UFPR para todo o estado do Paraná, a partir de um processo de interpolação de um conjunto de dados de altitudes ortométricas-normais, obtidas a partir de vetorização de curvas de nível

de cartas topográficas do mapeamento sistemático brasileiro (MSB) nas escalas 1:25.000 e 1:50.000, produzidas pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e pela DSG (Diretoria do Serviço Geográfico do Exército). As curvas de nível utilizadas foram geradas a partir de restituição fotogramétrica e, portanto, seguem, em tese, o contorno do terreno, possibilitando a geração do MDT. O método de interpolação utilizado foi o Topogrid (HUTCHINSON, 1988) e, mais detalhes sobre este modelo podem ser vistos em Silveira e Silveira (2015).

Considerando os cinco modelos analisados nesta pesquisa, no Quadro 1 são apresentados o método de obtenção de cada um, a resolução espacial aproximada, o tipo de altitude, o SRT, o SRV e a acurácia esperada de cada modelo, segundo indicações das agências responsáveis pelas distribuições dos produtos.

Quadro 1 – Características gerais dos modelos analisados.

MDS/versão e MDT	Método de obtenção	Abrangência espacial	Resolução espacial (aprox.)	Tipo de altitude	SRT/SRV	REQM esperado (aprox.)
SRTMGL1 v3	InSAR (Banda C)	Quase global	30 m	Ortométrica	WGS84/ EGM96	±6m a ±9m
ALOS PALSAR	InSAR (Banda L)	Quase global	12,5 m	Elipsoidal	WGS84/ Elipsoide WGS84	±6m a ±12m
ALOS PRISM (AW3D30) v3.1	Estereoscopia/ Paralaxe óptica	Quase global	30 m	Ortométrica	WGS84/ EGM96	±6m a ±8m
ASTER GDEM v3	Estereoscopia/ Paralaxe óptica	Quase global	30 m	Ortométrica	WGS84/ EGM96	±6m a ±12m
MDT LAGEO	Interpolação de dados altimétricos vetoriais nas escalas 1:50000 e 1:25000	Regional	20 m	Ortométrica-normal	SIRGAS2000/ DVBI	--

### III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a obtenção do conjunto de discrepâncias nas componentes altimétricas de todos os modelos na região de estudo, foram verificadas as hipóteses básicas de normalidade ( $H_0$ ) para as classes de áreas vegetadas e não vegetadas, a fim de se analisar a aplicabilidade do parâmetro estatístico percentil 95. Os resultados são indicados no Quadro 2.

Quadro 2 – Resultados do Teste de Shapiro-Wilk para as verificações de normalidade/não normalidade no conjunto amostral de discrepâncias altimétricas.

CLASSE	MDS				MDT
	SRTMGL1 v3	ALOS PALSAR	ASTER GDEM v3 (ASTGTM)	ALOS PRISM (AW3D30) v3.1	MDT LAGEO
Áreas vegetadas	$W_{calc} = 0,8720$ $W_{97;0,025} = 0,9739$ $W_{97;0,975} = 1,0000$ $H_0$ rejeitada	$W_{calc} = 0,8423$ $W_{97;0,025} = 0,9739$ $W_{97;0,975} = 1,0000$ $H_0$ rejeitada	$W_{calc} = 0,8587$ $W_{97;0,025} = 0,9739$ $W_{97;0,975} = 1,0000$ $H_0$ rejeitada	$W_{calc} = 0,7089$ $W_{97;0,025} = 0,9739$ $W_{97;0,975} = 1,0000$ $H_0$ rejeitada	$W_{calc} = 0,8425$ $W_{97;0,025} = 0,9739$ $W_{97;0,975} = 1,0000$ $H_0$ rejeitada
Áreas não vegetadas (urbano)	$W_{calc} = 0,8769$ $W_{48;0,025} = 0,9524$ $W_{48;0,975} = 1,0000$ $H_0$ rejeitada	$W_{calc} = 0,7936$ $W_{48;0,025} = 0,9524$ $W_{48;0,975} = 1,0000$ $H_0$ rejeitada	$W_{calc} = 0,8551$ $W_{48;0,025} = 0,9524$ $W_{48;0,975} = 1,0000$ $H_0$ rejeitada	$W_{calc} = 0,8768$ $W_{48;0,025} = 0,9524$ $W_{48;0,975} = 1,0000$ $H_0$ rejeitada	$W_{calc} = 0,7056$ $W_{48;0,025} = 0,9524$ $W_{48;0,975} = 1,0000$ $H_0$ rejeitada
Áreas não vegetadas (terreno aberto)	$W_{calc} = 0,8848$ $W_{20;0,025} = 0,9044$ $W_{20;0,975} = 1,0000$ $H_0$ rejeitada	$W_{calc} = 0,9125$ $W_{20;0,025} = 0,9044$ $W_{20;0,975} = 1,0000$ $H_0$ não rejeitada	$W_{calc} = 0,8715$ $W_{20;0,025} = 0,9044$ $W_{20;0,975} = 1,0000$ $H_0$ rejeitada	$W_{calc} = 0,8839$ $W_{20;0,025} = 0,9044$ $W_{20;0,975} = 1,0000$ $H_0$ rejeitada	$W_{calc} = 0,9443$ $W_{20;0,025} = 0,9044$ $W_{20;0,975} = 1,0000$ $H_0$ não rejeitada

Conforme pode ser observado no Quadro 2, apenas na classe referente às áreas não vegetadas com terreno aberto, no MDS ALOS PALSAR e no MDT LAGEO, o conjunto amostral de discrepâncias altimétricas pode ser considerado com distribuição normal. Isso tendo em vista que o valor de  $W_{calc}$  encontra-se no intervalo de confiança entre 2,5% e 97,5% (entre os valores de  $W_{20;0,025}$  e  $W_{20;0,975}$ ). Desta forma, para todos os demais casos, a análise indicada de acurácia seria pelo parâmetro percentil 95 ao invés do REQM associado a 90 ou 95% de nível de confiança. Porém, uma vez que a ARPRS (2015) não indica o uso do REQM para análise de NVA, seguiu-se com o uso do REQM com 95% de nível de confiança para terreno aberto e área urbana.

Verificada a hipótese de normalidade, foram calculados os valores de REQM, PEC (ou REQM90%), REQM95% para áreas não vegetadas (NVA) e percentil 95 (95th) para áreas vegetadas (VVA) e análise consolidada (CVA). Adicionalmente, foi realizado o enquadramento junto à classe A do PEC-PCD. Os resultados são apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Valores dos parâmetros estatísticos de acurácia absoluta e escala conforme PEC-PCD para os modelos na região de estudo.

Norma	Parâmetro estatístico	MDS				MDT
		SRTMGL1 v3	ALOS PALSAR	ASTER GDEM v3 (ASTGTM)	ALOS PRISM (AW3D30) v3.1	MDT LAGEO
ET-CQDG	REQM (m)	6,42	5,55	7,85	6,35	6,41
ASPRS	NVA (terreno aberto) – REQM <sub>95%</sub> (m)	8,21	6,41	16,72	7,84	8,47
	NVA (urbano) – REQM <sub>95%</sub> (m)	10,95	9,92	13,05	8,09	15,88
	VVA – 95 <sup>th</sup> (m)	13,95	11,59	14,68	14,30	11,32
	CVA – 95 <sup>th</sup> (m)	12,18	10,47	15,93	11,46	13,75
ET-CQDG	PEC (REQM <sub>90%</sub> ) (m)	10,56	9,13	12,92	10,45	10,54
ET-CQDG	ESCALA classe A (PEC-PCD)	1:100.000	1:100.000	1:100.000	1:100.000	1:100.000

Inicialmente, considerando apenas o REQM (sem separação de classes de uso e cobertura do solo - Quadro 3), observou-se que na área de estudo o MDS ALOS PALSAR apresentou o melhor resultado de acurácia absoluta. Tal questão pode estar relacionada com a resolução espacial mais fina (12,5m) e ao comprimento de onda empregado (L - 15 a 30cm). Na sequência, em ordem decrescente de acurácia têm-se os MDSs ALOS PRISM (AW3D30) e SRTMGL1 v3, e o modelo regional/local MDT LAGEO, os quais apresentaram resultados próximos, com diferenças na ordem do centímetro.

Uma questão que cabe ser mencionada, é que o modelo AW3D30 não apresentou o melhor resultado apesar de ser originalmente obtido com 5m de resolução (disponibilizado comercialmente), via processo de estereoscopia/paralaxe óptica a partir de imagens com resolução espacial de 2,5m. Isso, provavelmente, por conta do processo de reamostragem para a geração do modelo com 30m de resolução espacial (gratuito), o que proporciona uma perda de qualidade altimétrica por generalização de informação.

O pior resultado (REQM = 7,85m) foi o do MDS ASTER GDEM v3 (ASTGTM), o qual é 2,30m inferior ao observado no MDS ALOS PALSAR. Tal questão pode estar relacionada com o modo de obtenção das imagens singulares para a formação do par estereoscópico. Neste caso, o MDS é gerado a partir de um par de imagens, uma com visada para o nadir (3N) e outra para direção de ré (3B), ao contrário do PRISM que utiliza três visadas (ré, nadir e vante). Além disso, a resolução do sensor ASTER nas bandas 3N e 3B é de 15m.

Na análise da acurácia para classe terreno aberto (NVA – terreno aberto: REQM<sub>95%</sub>) o MDS ALOS PALSAR apresentou o melhor resultado. Similarmente à análise anterior, na sequência, os modelos AW3D30, SRTMGL1 e MDT LAGEO obtiveram resultados de REQM<sub>95%</sub> próximos, com diferença máxima de aproximadamente 0,62m entre os modelos AW3D30 e MDT LAGEO. O pior resultado foi o do modelo ASTGTM

(REQM95% = 16,72m), 10,31m pior em relação ao ALOS PALSAR, o que pode estar relacionado à questão mencionada anteriormente.

Para o caso de áreas urbanas (NVA – urbano: REQM95%), o modelo que apresentou melhor resultado foi o AW3D30, seguido pelo ALOS PALSAR com diferença de aproximadamente 1,80m. Os demais modelos apresentaram resultados de REQM95% acima de 10m, sendo que o pior resultado foi obtido com o MDT LAGEO (aprox. 16m). Isso está relacionado com o fato de que parte dos pontos urbanos encontra-se em topos de edificações e, o MDT foi construído a partir de dados obtidos por recobrimento aerofotogramétrico, com processo de estereoscopia/paralaxe óptica, seguindo o contorno do terreno, o que resultou em maiores discrepâncias.

As divergências observadas entre os valores de NVA – terreno aberto (REQM95%) e NVA – urbano (REQM95%), foram em média de 3,51m para o conjunto dos modelos testados. Contudo, na análise individualizada dos modelos, foi possível observar diferenças de até 7,41m (MDT-LAGEO) e 3,67m para o ALOS PALSAR (modelo que apresentou o melhor valor de NVA – terreno aberto). Isso indica que os modelos podem apresentar distintos padrões de qualidade com diferenças significativas em função da classe de uso.

Outra questão é que no geral, em área urbana os resultados apresentaram-se piores do que em terreno aberto. Isso pode estar relacionado com a resolução espacial dos modelos e com a localização de pontos no topo de edificações e em espaços relativamente curtos entre edificações. Neste caso, a baixa resolução espacial tende a prejudicar os resultados, uma vez que diferentes valores altimétricos podem ser observados, em campo, em relação a um único pixel do modelo, ou seja, quanto menor a resolução espacial do modelo, maior a dificuldade de aquisição de valores representativos para sua validação.

Ainda no contexto da análise por classes, para o caso de áreas vegetadas (VVA) da região de estudo, os modelos MDT LAGEO e ALOS PALSAR apresentaram os melhores resultados de percentil 95, com diferença de aproximadamente 0,27m. No caso do MDT, tem-se a questão já mencionada do modelo representar o contorno do terreno, obtido por restituição aerofotogramétrica. Já no caso do modelo ALOS PALSAR, o melhor resultado pode estar relacionado ao fato do uso de radar na banda L, a qual apresenta maior penetração em dosséis de vegetação do que a onda na banda C do modelo do SRTM. Adicionalmente, tem-se a questão da resolução espacial relativamente mais fina do sensor PALSAR para a aquisição dos dados. Na sequência, na ordem decrescente de acurácia, têm-se os modelos SRTMGL1, AW3D30 e ASTGTM, com diferença máxima entre o mais e o menos acurado de aproximadamente 0,70m.

Para a questão do PEC-PCD, observou-se que todos os modelos testados na região de estudo se enquadram na escala 1:100.000, tendo como referência a classe A. Apesar do MDT LAGEO ter sido gerado a partir de cartas nas escalas 1:25.000 e 1:50.000, o modelo derivado também se enquadra na escala 1:100.000 para a classe A. Isso pode estar relacionado a dois fatores, sendo o primeiro relativo aos valores de EP e PEC utilizados anteriormente no enquadramento das cartas (grande parte produzidas nas décadas de 70/80) e o segundo relativo ao processo de interpolação.

Até a edição da ET-CQDG (2016), os valores de EP e PEC para classe A eram de 6,66m e 10m, respectivamente, para escala 1:50.000, passando para 3,33m e 5,50m para dados da cartografia digital (PEC-PCD), o que possibilitava, à época, o enquadramento dos dados na escala 1:50.000. Contudo, a análise dos dados por escala, indicou que nas áreas das cartas 1:25.000 o REQM observado foi de 5,13m (106 pontos de checagem), o que resulta no enquadramento do MDT na escala 1:50.000 e, nas áreas das cartas 1:50.000 o REQM foi de 8,23m (59 pontos de checagem), o que resulta no enquadramento na escala 1:100.000. Isso pode estar relacionado ao segundo fator que é a redução da qualidade em função do uso de interpoladores. Conforme apontado por Sampaio e Brandalize (2018), processos de reamostragem, interpolação e filtragem em geral reduzem a qualidade dos dados originais, por inserirem erros de posicionamento e outros subjacentes ao próprio processo.

Uma questão a ser mencionar é que inconsistências (discrepâncias grosseiras) foram encontradas no MDT LAGEO e, de acordo com a ASPRS, esses casos devem ser verificados pontualmente. Assim, os valores observados foram analisados em relação às cartas topográficas do MSB e comparados aos modelos que apresentaram os melhores valores de acurácia (ALOS PALSAR e ALOS AW3D30). Um exemplo utilizando três cartas topográficas e os modelos ALOS (PALSAR e PRISM) pode ser visto na Figura 3, no qual o comportamento da altimetria é caracterizado a partir de perfis topográficos (ver no recorte no canto inferior esquerdo da figura - a linha vermelha correspondente ao perfil).

Conforme pode ser visto na carta mais à esquerda, o MDT LAGEO apresenta valores compatíveis com os observados nos demais modelos, enquanto na carta ao centro, apresenta valores superiores aos observados e, na carta à direita, valores inferiores.

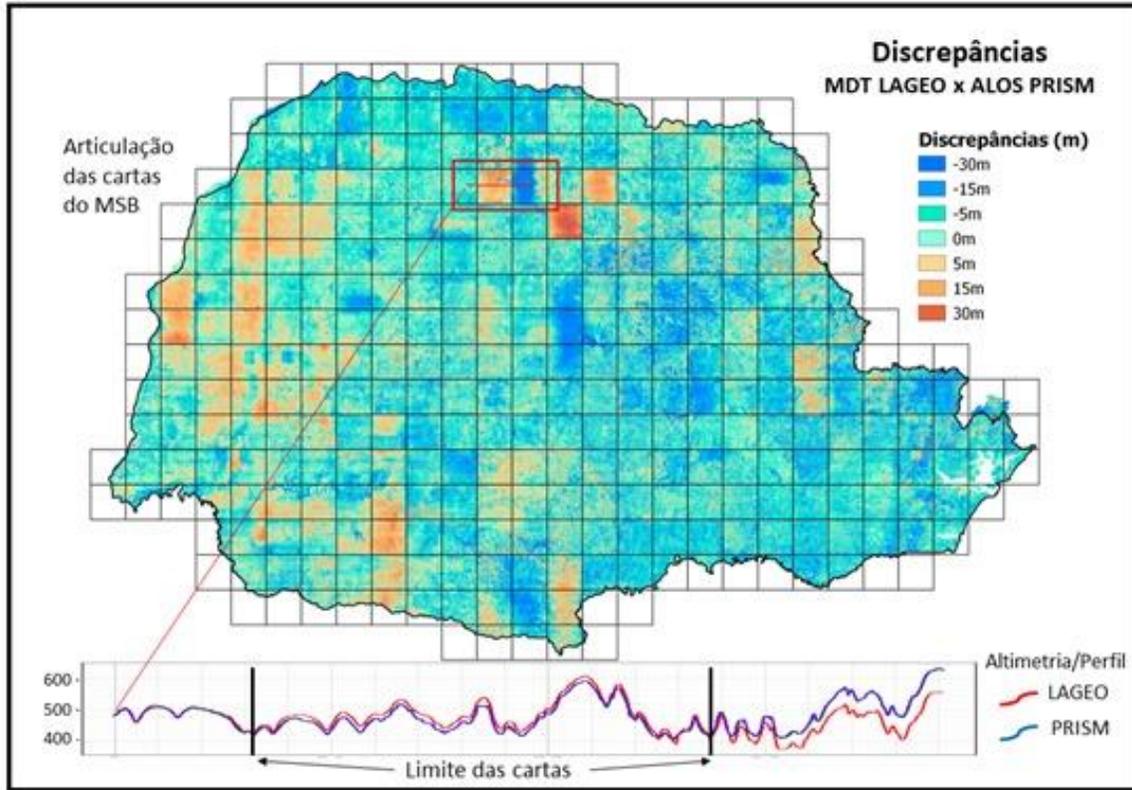


Figura 3 – Exemplo de inconsistências locais em um perfil topográfico sobreposto a três cartas topográficas do MSB.

É possível observar na figura 3 que o MDT LAGEO apresenta valores ora superiores e ora inferiores ao modelo AW3D30, estando esses nitidamente associados aos limites das cartas topográficas. Para uma análise mais detalhada, foram verificados dois pontos situados sobre perfil topográfico (figura 4) utilizado no exemplo anterior. No primeiro caso (lado esquerdo) o ponto apresenta cotas 526,76m (MDT LAGEO) e 569m (ALOS PALSAR e AW3D30) com divergência altimétrica de 52,23m. Conforme pode ser observado no perfil (figuras 3 e 4), o MDT LAGEO apresenta morfologia similar à dos demais modelos contudo, encontra-se localmente rebaixado nesta carta. No segundo caso (lado direito), o ponto apresenta cotas 492,21m (MDT LAGEO) e 477m (modelos ALOS PALSAR e AW3D30) com divergência altimétrica de 15,21m. Também neste caso, a análise do perfil indica que os modelos apresentam morfologia similar, contudo, os valores apresentados no MDT LAGEO encontram-se superestimados nesta carta em relação aos demais modelos.

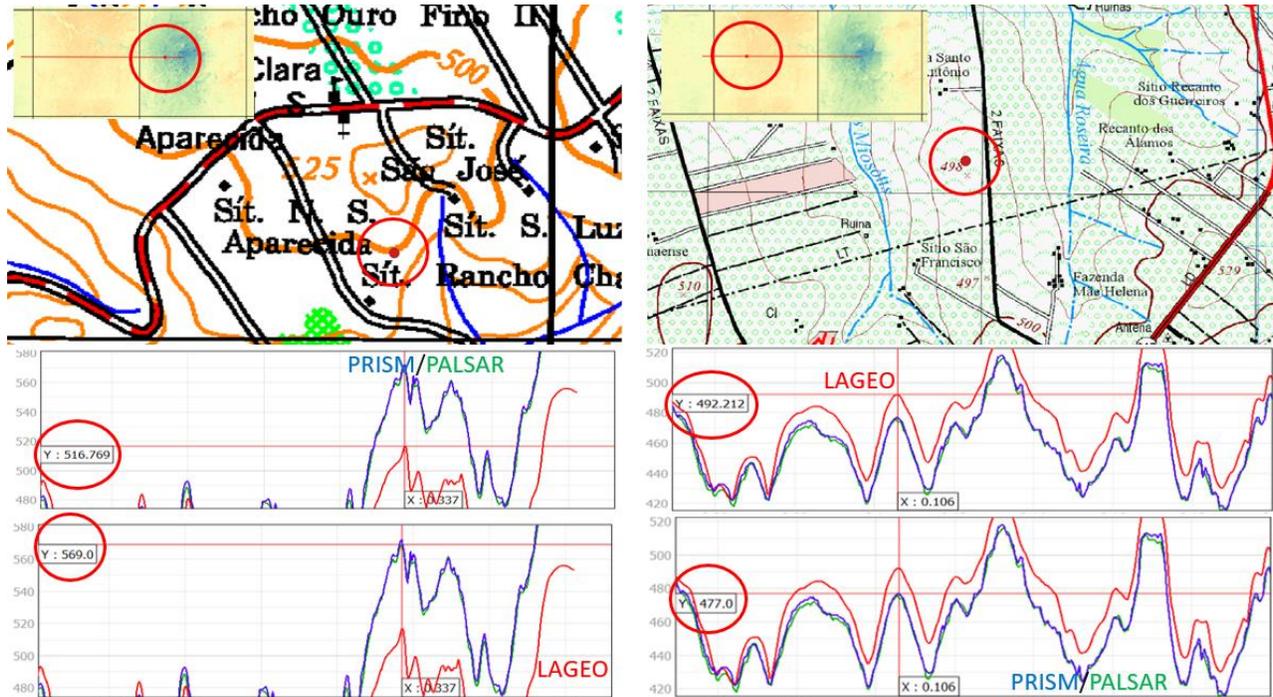


Figura 4 – Exemplo de inconsistências locais pontuais em duas cartas topográficas do MSB.

Em certos locais, é nítida a descontinuidade nos valores restituídos (curvas de nível) em relação à transição entre as cartas (figura 5). Neste exemplo, é possível observar que nos dois pontos localizados, em tese, sobre a curva mestra de valor 600m, os valores dos modelos divergem. Enquanto o MDT LAGEO segue de forma mais aproximada os valores das curvas de nível nos dois pontos, os valores observados no modelo AW3D30 são coerentes somente no ponto mais ao sul.

Cabe observar que os MDTs obtidos por interpolação são diretamente condicionados pelos valores observados nas curvas de nível e pontos cotados e, no caso do interpolador utilizado, são sensíveis também à representação da rede drenagem (utilizada no processo de interpolação). Contudo, estes valores nem sempre são concordantes quando se considera a conexão de cartas e a realidade de campo, uma vez que podem ser obtidos em diferentes processos de recobrimento e restituição aerofotogramétrica.

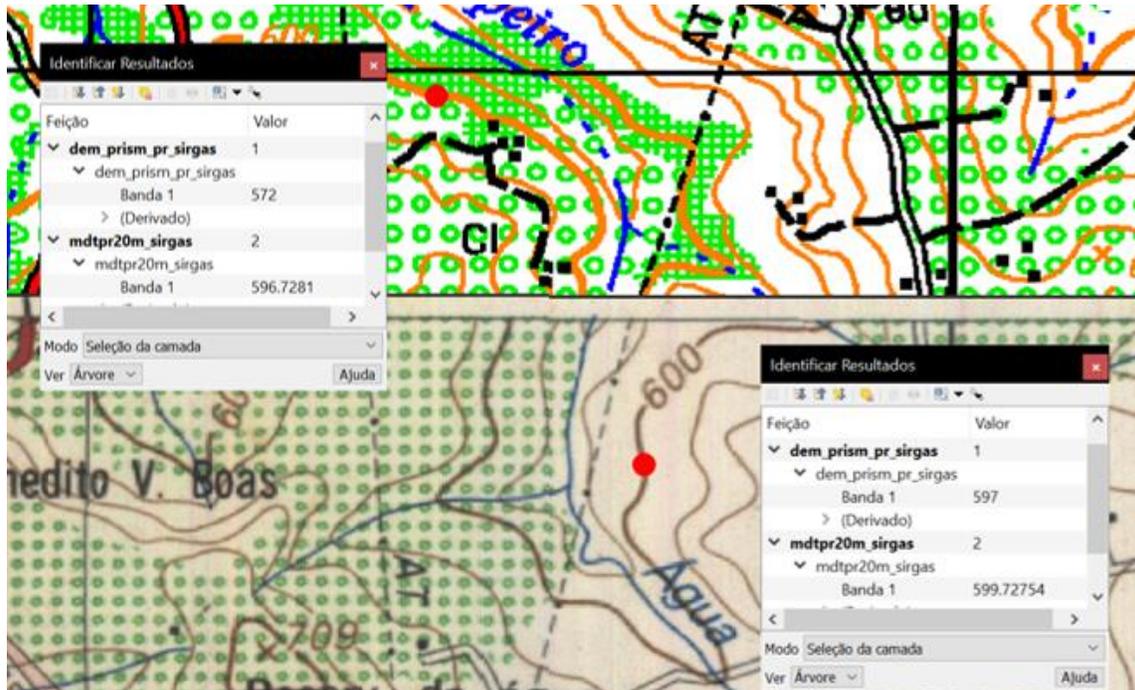


Figura 5 – Exemplo de descontinuidade nos valores restituídos de curvas de nível em duas cartas topográficas.

#### IV. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho propôs a análise da acurácia vertical absoluta de cinco MDSs/MDTs de acesso e uso gratuitos a saber: SRTMGL1 v3, ALOS PALSAR, ALOS PRISM v3.1 (AW3D30), ASTER GDEM v3 (ASTGTM) e MDT LAGEO. Os resultados observados são relativos ao estado do Paraná, cabendo novas investigações em outras áreas.

Seguindo o indicado na norma internacional da ASPRS, foram avaliadas as acurácias em diferentes classes de uso. Diante dos resultados obtidos, conclui-se que, para projetos a serem desenvolvidos no Paraná em áreas de vegetação, o uso do modelo ALOS PALSAR ou do MDT LAGEO devem ser priorizados, uma vez que apresentaram os melhores resultados.

Para projetos a serem desenvolvidos em áreas não vegetadas na área de estudo, no caso de terrenos abertos, indica-se o uso do MDS ALOS PALSAR e, para áreas urbanas, o MDS AW3D30, os quais apresentaram melhores valores de acurácia nestes locais.

Nas análises consolidadas, utilizando tanto o PEC (REQM90%) quanto o percentil 95, o MDS ALOS PALSAR apresentou melhores resultados, sendo este o indicado para projetos a serem desenvolvidos no Paraná e que empreguem diferentes classes de uso.

Cabe ressaltar que no MDS ALOS PALSAR o usuário obterá valores de altitudes elipsoidais referenciadas ao WGS-84. Tais altitudes podem ser transformadas para altitudes ortométricas a partir do uso do software MAPGEO 2015 (para o Brasil), ou para altitudes normais com o uso de algum MGG de alto grau e ordem disponível no sítio eletrônico do ICGEM. Neste trabalho, chegou-se a um valor de 0,204 m utilizando-se o MGG EGM96. Assim sendo, tais diferenças são passíveis de serem negligenciadas, face à acurácia esperada de cada modelo (Quadro 1).

A pesquisa mostrou que a geração de MDTs regionais a partir de processos de interpolação pode resultar em valores de acurácia superiores aos observados nos modelos globais hoje disponíveis de forma gratuita, em especial para os locais em que se dispõe de bases cartográficas em escala melhor que 1:50.000. Contudo, fica indicada a necessidade de observância de inconsistências e tendências associadas à transição das cartas topográficas, bem como a redução na qualidade vertical do modelo em relação aos dados originais, decorrente do processo de interpolação.

Com relação à análise do PEC-PCD, apesar de todos os MDSs apresentarem o mesmo referencial de enquadramento quanto à escala (1:100.000), as divergências observadas entre os modelos revelam que a escolha de um modelo em detrimento de outro implica em divergência de acurácia da ordem de até 10m. Tal divergência irá influenciar diretamente nos parâmetros que utilizam a informação altimétrica, como a declividade, o índice de rugosidade, a densidade de drenagem e ângulo de encostas.

A pesquisa indicou que as diferentes classes de uso presentes em MDSs/MDTs podem apresentar padrões de qualidade significativamente distintos.

O uso híbrido de um MDT e um MDS, concordantes até o nível do decímetro em termos de acurácia, pode ser interessante por considerar o melhor de cada modelo, porém, um registro vertical de modelos seria importante.

Por fim, cabe observar que as discrepâncias altimétricas observadas na maioria das classes de uso e modelos testados apresentaram cenário de não normalidade indicando que a proposta de caracterização da acurácia vertical via uso do percentil 95 se mostrou mais adequada para a maioria dos modelos testados.

### **Agradecimentos**

Esta pesquisa é parte da desenvolvida no âmbito do projeto intitulado "PD-06491-0353/2014- Desenvolvimento de um método automático para estimativa otimizada da diretriz do traçado de linhas de

transmissão de energia usando um modelo inverso de programação dinâmica e variáveis meteorológicas”, fruto de parceria entre a UFPR, o Sistema Meteorológico do Paraná- Simepar e a Companhia Paranaense de Energia (COPEL).

## V. REFERÊNCIAS

- ASPRS. ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, v. 81, n. 3, p. 1–26, 2015.
- BOULTON, S. J.; STOKES, M. Which DEM is best for analyzing fluvial landscape development in mountainous terrains? *Geomorphology*, v. 310, 2018.
- CASAS, A.; BENITO, G.; THORNDYCRAFT, V. R.; RICO, M. The topographic data source of digital terrain models as a key element in the accuracy of hydraulic flood modelling. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 3, n. 4, p. 444-456, 2006.
- COLLINS, S. H. The Ideal Mechanical Parallax for Stereophotos. *The Canadian Surveyor*, 1970.
- DOYLE, F.J. Digital terrain models: an overview. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v.44, n.12, p.1481-1485, 1978.
- DSG - DIRETORIA DE SERVIÇO GEOGRÁFICO. NORMA DA ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA PARA CONTROLE DE QUALIDADE DE DADOS GEOESPACIAIS (ET-CQDG), 1ª ed. 2016, p. 94.
- EINER, M.; KRIEGER, G.; ROTH, A. First data acquisition and processing concepts for the TanDEM-X mission. In: *From Sensors to Imagery. ISPRS Commission I Symposium*, [2006-07-03 - 2006-07-06], Paris.
- EL-SHEIMY, N.; VALEO, C.; HABIB, A. *Digital terrain modeling: Acquisition, manipulation and applications*. Calgary: Artech House, 2005.
- FELGUEIRAS, C.; MARA, G. Modelagem Numérica de Terreno. *Introdução à ciência da geoinformação*, v. 1, p.1, 2001.
- FGDC. Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3 : National Standard for Spatial Data Accuracy. World, p. 28, 1998. Disponível em: <<http://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDC-standards-projects/accuracy/part3/chapter3>>.
- FONSECA, B. M.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Análise morfométrica de bacias de drenagem e sua relação com a estrutura geológica, Serra do Espinhaço Meridional-MG. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 2, p. 153–172, 2014.
- GIROD, L.; NUTH, C.; KÄÄB, A.; MCNABB, R.; GALLAND, O. MMASTER: Improved ASTER DEMs for elevation change monitoring. *Remote Sensing*, v. 9, n. 7, 2017.
- HANIEF, A.; LAURSEN, A. E. Modeling the Natural Drainage Network of the Grand River in Southern Ontario: Agriculture May Increase Total Channel Length of Low-Order Streams. 2019.
- HUTCHINSON, M. F. Calculation of hydrologically sound digital elevation models. In: *Third International Symposium on Spatial Data Handling at Sydney, Australia*, 1988.

- IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - Diretoria de Geociências - Coordenação de Geodésia. Reajustamento da Rede Altimétrica com Números Geopotenciais, 2ª ed., 2019.
- INCRA - INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA - Diretoria de Ordenamento da Estrutura Fundiária - Coordenação Geral de Cartografia. Manual Técnico de Posicionamento, 3ª ed, 2013.
- LI, Z.; ZHU, Q.; GOLD, C. M. Digital terrain modelling. Principles and methodology. 2005.MCBRATNEY, A. B.; MENDONÇA SANTOS, M. L.; MINASNY, B. On digital soil mapping. [S.l: s.n.], v. 117, 2003.
- MELO, O. A. G.; DOUHI, N.; FRANÇA JUNIOR, P.; SANTOS, M. L. Verificação da influência da imposição litoestrutural sobre a drenagem da bacia hidrográfica do Rio Baiano/Assis Chateaubriand - PR a partir da aplicação de variáveis morfométricas. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 03, p. 7–13, 2010.
- MOORE I. D.; GRAYSON R. B.; LADSON, A. R. Digital Terrain Modelling: A Review Of Hydrological, Geomorphological, And Biological Applications. Hydrological Processes, v. 5, p. 3-30, 1991.
- MONTECINO, H. Proposta de alternativas para conexão dos data verticais brasileiros de Imbituba e Santana. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.
- MUKUL, M., SRIVASTAVA, V. & MUKUL, M, 2015. Analysis of the accuracy of Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) height models using International Global Navigation Satellite System Service (IGS) Network. J Earth Syst Sci 124, 1343–1357 . <https://doi.org/10.1007/s12040-015-0597-2>
- PRIESTNALL, G., JAAFAR, J., DUNCAN, A. Extracting urban features from LiDAR digital surface models. Computers. Environment and Urban Systems, v. 24, n. 2. p. 65-78, 2000.
- OUERGI, S.; ELSHEIKH, R. F. A.; ACHOUR, H.; BOUAZI, S. Evaluation and Validation of Recent Freely-Available ASTER-GDEM V.2, SRTM V.4.1 and the DEM Derived from Topographical Map over SW Grombalia (Test Area) in North East of Tunisia. Journal of Geographic Information System, 2015.
- ROKNI, K.; AHMAD, A.; HAZINI, S. Comparative analysis of ASTER DEM, ASTER GDEM, and SRTM DEM based on ground-truth GPS data. Jurnal Teknologi, v. 76, n. 1, p. 97-102, 2015.
- SAMPAIO, T. V. M.; BRANDALIZE, M. C. B. Cartografia geral, digital e temática. 1. ed. Curitiba - PR: [s.n.], 2018. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=NLIjDwAAQBAJ>>. (Geotecnologias: teoria e prática).
- SÀNCHEZ, J. L. C.; DE FREITAS, S. R. C. Estudo do Sistema Vertical de Referência do Equador no Contexto da Unificação do Datum Vertical. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 22, n. 2, p. 248–264, 2016.
- SANTILLAN, J.R.; MAKINANO-SANTILLAN, M. Vertical accuracy assessment of 30-M resolution ALOS, ASTER, and SRTM global DEMS over Northeastern Mindanao, Philippines. ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. XLI-B4, pp.149-156, 2016.
- SILVEIRA, R.M.P.; SILVEIRA, C.T. Análise comparativa entre modelos digitais de elevação com distintas características de processamento e aquisição. Boletim de Geografia, v. 33, n. especial, p. 106-121, 2015.
- SHIMADA, M.; ISOGUCHI, O.; TADONO, T.; ISONO, K. PALSAR Radiometric and Geometric Calibration. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 47, n. 12, p. 3915–3932, 2009.
- TADONO, T.; NAGAI, H.; ISHIDA, H.; et al. Generation of the 30 M-MESH global digital surface model by alos prism. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS

---

Archives, v. 41, n. July, p. 157–162, 2016.

TACHIKAWA, T.; HATO, M.; KAKU, M.; IWASAKI, A. Characteristics of ASTER GDEM version 2. International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). Anais... . p.3657–3660, 2011.

TOUTIN, T. Stereo-mapping with SPOT-P and ERS-1 SAR images. International Journal of Remote Sensing, v.21, n. 8, p. 1657-1674, 2000.

UYSAL, M.; TOPRAK, A. S.; POLAT, N. DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, v. 73, p. 539-543, 2015.

VALERIANO, M. Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul. INPE-10550-RPQ/756, p. 72, 2004.

WEIBEL, R.; HELLER, M. Digital terrain modelling. Oxford University Press, 1993.

YAMAZAKI, D.; IKESHIMA, D.; TAWATARI, R.; et al. A high-accuracy map of global terrain elevations. Geophysical Research Letters, v. 44, n. 11, 2017.

---