

## INTEGRAÇÃO DO BANCO DE DADOS DO SIGEF E DA FUNDAÇÃO ITESP PARA VALIDAÇÃO DA ACURÁCIA VERTICAL DE MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIE

**Vagner Souza Machado**

Universidade do Oeste Paulista, Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional, Presidente Prudente, SP, Brasil  
[vagcarto@gmail.com](mailto:vagcarto@gmail.com)

**Mariany Kerriany Gonçalves de Souza**

Universidade do Oeste Paulista, Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional, Presidente Prudente, SP, Brasil  
[kerriany\\_gon@yahoo.com](mailto:kerriany_gon@yahoo.com)

**Lucas Prado Osco**

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, Campo Grande, MS, Brasil  
[pradoosco@gmail.com](mailto:pradoosco@gmail.com)

**José Marcato Junior**

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia, Campo Grande, MS, Brasil [jose.marcato@ufms.br](mailto:jose.marcato@ufms.br)

**Ana Paula Marques Ramos**

Universidade do Oeste Paulista, Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional, Presidente Prudente, SP, Brasil  
[anaramos@unoeste.br](mailto:anaramos@unoeste.br)

### RESUMO

A confiabilidade geométrica de um Modelo Digital de Superfície (MDS) afeta diretamente a qualidade dos produtos gerados a partir dele. Como continuação de pesquisa já iniciada e publicada por Machado et al. (2019), nesse trabalho, é proposto a avaliação da acurácia vertical de MDS gratuitos, utilizando um denso conjunto de pontos provenientes dos bancos de dados do Sistema de Gestão Fundiária (SIGEF) e da Fundação Instituto de Terras do Estado de São Paulo (ITESP). A validação foi aplicada nos seguintes modelos: MDS v3 SRTM, ALOS-Palsar, ASTER GDEM2 e *Bare-Earth* SRTM. O Conjunto inicial de pontos adquiridos foi submetido a filtragens sistemáticas e remoção de *outliers* seguindo recomendações da literatura recente. O controle de qualidade dos MDS foi baseado no Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD). Conclui-se que o MDS ALOS-Palsar é o mais acurado para a área estudada, seguido do MDS v3 SRTM, sendo, ambos, indicados para a elaboração de produtos na escala 1:50.000. Estudos similares poderiam ser aplicados em demais regiões do Brasil para demonstrar a qualidade dos MDS atualmente disponíveis contribuindo para o controle de qualidade vertical desses dados.

**Palavras-chave:** Controle de qualidade. Produção cartográfica. Banco de dados geográfico.

### INTEGRATION OF SIGEF AND ITESP FOUNDATION DATABASES FOR VALIDATION OF VERTICAL ACCURACY OF DIFFERENT DIGITAL SURFACE MODELS

### ABSTRACT

The geometric reliability of Digital Surface Model (DSM) affects the quality of the products generated from it. As a continuation of the research already started and published by Machado et al. (2019), in this paper, we propose the assessment of the vertical accuracy of free-available MDS, using a large set of points from the Land Management System (SIGEF) and the São Paulo State Land Institute (ITESP) databases. The validation was applied in the following models: DSM v3 SRTM, ALOS-Palsar, ASTER GDEM2 and *Bare-Earth* SRTM. The initial set of points acquired was subjected to systematic filtering and removal of outliers

following recent literature recommendations. The quality control of the DSM was based on the Cartographic Accuracy Standard for Digital Cartographic Products (PEC-PCD). It was concluded that DSM ALOS-Palsar is the most accurate for the study area, followed by DSM v3 SRTM, both being indicated for the elaboration of products in the 1:50.000 scale. Similar studies could be applied for other regions of Brazil to demonstrate the quality of the MDS currently available and to contribute to vertical quality control of these data.

**Keywords:** Quality control. Cartographic production. Geographic Database.

## INTRODUÇÃO

Modelos Digitais de Superfícies (MDS) são importantes fontes de dados digitais representativos da superfície terrestre. Aliados às técnicas de geoprocessamento, os MDS se tornam importantes ferramentas em diversas aplicações (MOURA et al., 2008; PINTO e AMORIM, 2011; SPANGHERO et al., 2015; CORREA et al., 2017; CUNHA et al., 2018). Dentre as aplicações podem-se citar:

- Aplicações Ambientais: extração da rede de drenagem, da declividade do terreno, de curvas de nível, do mapa de sombreamento do relevo, da orientação de vertentes, do fluxo de escoamento da água, delimitação de bacia hidrográfica, etc.;
- Aplicações de engenharia: perfil topográfico, corte e aterro, etc.;
- Aplicações cartográficas: ortorretificação de imagens de satélite ou fotografias aéreas, construção de modelos 3D da paisagem, etc.

Variados MDS com cobertura quase que global são disponibilizados online gratuitamente, como: o MDS v3 do SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), o ASTER (*Advanced Spaceborne Thermal Emission Reflection Radiometer*) Global DEM2 (GDEM2), o ALOS-Palsar (*Advanced Land Observing Satellite-1*) e o *Bare-Earth* oriundo do MDS v1 do SRTM. Com resolução espacial de 30 metros, os MDS do SRTM v3 e do ASTER GDEM2 são as versões mais recentes disponibilizadas, respectivamente, pelas missões SRTM e pelo satélite ASTER. O ALOS-Palsar, com resolução espacial de 12,5 metros, é uma versão desenvolvida com os dados do sensor Palsar do Satélite ALOS, ao passo que o *Bare-Earth* SRTM é uma versão não-oficial, corrigida do MDS SRTM v1 e desenvolvida por O'Loughlin et al. (2016), com resolução espacial de 90 metros.

A qualidade geométrica de um MDS depende do tipo e da magnitude dos erros a ele relacionados. Segundo Patel et al. (2016), existem vários fatores que afetam a precisão de MDS baseados em satélites, como o erro na orientação das imagens estéreo para valores de elevação determinados fotogrametricamente, os erros devidos às condições do terreno, bem como os erros devidos aos métodos de interpolação empregados na geração desses modelos. Nesse sentido, para que um MDS possa ser utilizado na produção cartográfica, visando atender diferentes áreas do conhecimento, deve-se primeiro, conhecer a acurácia altimétrica desse modelo para a área de estudo.

Moura et al. (2014) realizaram a validação da acurácia altimétrica dos MDS referentes ao ASTER GDEM2 (30 m), SRTM v4 (90 m), TOPODATA (30 m), HydroSHEDS DEM (90 m) para as bacias do rio Paranoá e do rio São Bartolomeu no Distrito Federal. Foram adotados um total de 42 pontos de verificação obtidos da rede geodésica da Terracap. Marini et al (2017) desenvolveram um trabalho similar de controle de qualidade dos dados de altimetria do MDS SRTM (90 m e 30 m), ASTER GDEM (30 m) e TOPODATA (30 m), para todo o estado de Mato Grosso do Sul. Como referência altimétrica, utilizaram 122 marcos geodésicos (SAT) do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) disponível para a área. Mukul et al. (2017) avaliaram a acurácia altimétrica do MDS SRTM bandas C90, C30 e X30 para a região peninsular e do Himalaia indiano, utilizando 220 pontos obtidos por GPS (*Global Positioning System*). Patel et al. (2016) compararam a acurácia altimétrica dos MDS ASTER GDEM (30 m), Cartosat-1 (30 m) e SRTM v1 (90 m) para a cidade de Bhopal, capital de Madhya Pradesh, Índia. Essa validação foi realizada usando 830 pontos de verificação obtidos em campo com GPS. Santillan e Makinano-Santillan (2016) avaliaram a acurácia vertical do MDS ALOS World3d (30 m), ASTER GDEM2 (30 m) e SRTM v3 (30 m) para a região nordeste de Mindanao, Filipinas, adotando por referencial altimétrico um conjunto de 274 pontos levantados em campo com GPS.

Machado et al. (2019) relatam que a validação da acurácia altimétrica dos MDS é tema de interesse em diferentes regiões do mundo, e que na maioria dos trabalhos encontrados na literatura, a quantidade de pontos de verificação utilizados na validação desses modelos é relativamente pequena. Isso é

devido aos custos inerentes ao levantamento de campo e pela necessidade de se ter uma distribuição homogênea desses pontos na área de interesse. Essa tarefa nem sempre é fácil devido às dificuldades de acesso à partes da área em estudo, ou mesmo quando se utiliza pontos de redes geodésicas consolidadas, tal como no trabalho de Marini et al. (2017).

A Tabela 1 ilustra essa realidade relatada por Machado et al. (2019), onde observa-se a extensão da área estudada dos trabalhos citados anteriormente, bem como a quantidade de pontos utilizados e a densidade (pontos/km<sup>2</sup>) obtida para cada área. Observa-se que com a exceção do trabalho de Patel et al. (2016), onde foi estudada uma pequena área da cidade de Bhopal, Índia, a densidade não é superior a 1 ponto por quilômetro quadrado.

Tabela 1 - Densidade de Pontos utilizados nos trabalhos.

| Pesquisa                             | área de estudo aprox. (km <sup>2</sup> ) | quantidade de pontos | densidade (pontos/km <sup>2</sup> ) |
|--------------------------------------|--|----------------------|-------------------------------------|
| Moura et al., 2014                   | 2583,9                                   | 42                   | 0,01625                             |
| Marini et al., 2017                  | 357125                                   | 122                  | 0,00034                             |
| Mukul et al., 2017                   | 2000000                                  | 220                  | 0,00011                             |
| Patel et al., 2016                   | 3,65                                     | 830                  | 227,40                              |
| Santillan e Makinano-Santillan, 2016 | 97530                                    | 274                  | 0,00281                             |

Fonte: elaborado pelos autores.

Pereira et al. (2019) propõem a utilização do banco de dados geográfico do Sistema de Gestão Fundiária (SIGEF) como fonte de pontos de verificação para validação da acurácia altimétrica de MDS no território brasileiro. O SIGEF é um sistema *online* de gestão fundiária, que possui um volumoso conjunto de pontos (E,N,H) levantados em campo, e que foi desenvolvido em parceria entre o Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA) e pelo Ministério de Desenvolvimento Agrário (MDA) para gestão de informações fundiárias do meio rural brasileiro. Pelo SIGEF são efetuadas a recepção, a validação, a organização, a regularização e a disponibilização de informações georreferenciadas de imóveis rurais no Brasil (SIGEF, 2019).

No trabalho de Pereira et al. (2019) foram utilizados pontos extraídos do SIGEF como referencial altimétrico na validação dos MDS SRTM v1, SRTM v3, TOPODATA, ASTER GDEM, ALOS-Palsar e ALOS World3d em duas bacias hidrográficas no estado do Tocantins. No entanto, se considerada a extensão da área em estudo (aproximadamente 5.826 km<sup>2</sup>) e a quantidade de pontos (305), nota-se que poucos foram os pontos de verificação frente ao banco de dados disponível pelo SIGEF. Ademais, Pereira et al. (2019) não relatam se foi realizado algum tipo de análise da confiabilidade dos dados do SIGEF antes de assumir esses dados como referencial altimétrico. Isso é uma decisão metodológica importante, visto que Machado et al. (2019) mostram que os dados altimétricos do SIGEF podem ser utilizados em validações da acurácia altimétrica de MDS após a filtragem e remoção de *outliers* nesse banco de dados. A explicação para isso é de que os dados do SIGEF são levantados por profissionais de diferentes áreas e, durante o levantamento, podem ser usados métodos de posicionamento distintos e(ou) equipamentos com diferentes precisões, o que influencia a acurácia das coordenadas dos pontos (MACHADO et al., 2019).

Este trabalho é uma continuação da pesquisa iniciada em 2018, a qual resultou no artigo intitulado "Validação da Acurácia Vertical de Modelos Digitais de Superfície Utilizando o Banco de Dados do Sistema de Gestão Fundiária: Um Estudo de Caso no Oeste do Estado de São Paulo" de Machado et al. (2019). Os autores analisaram a confiabilidade dos dados do SIGEF na utilização deles como referencial altimétrico na validação de MDS. Como estudo de caso foi utilizado uma cena do SRTM v3 para uma pequena porção da região denominada Pontal do Paranapanema, localizada no oeste do estado de São Paulo. Os resultados foram comparados com a validação da mesma cena utilizando os dados de alta precisão fornecidos pela Fundação Itesp. O presente trabalho propõe-se a avaliação da

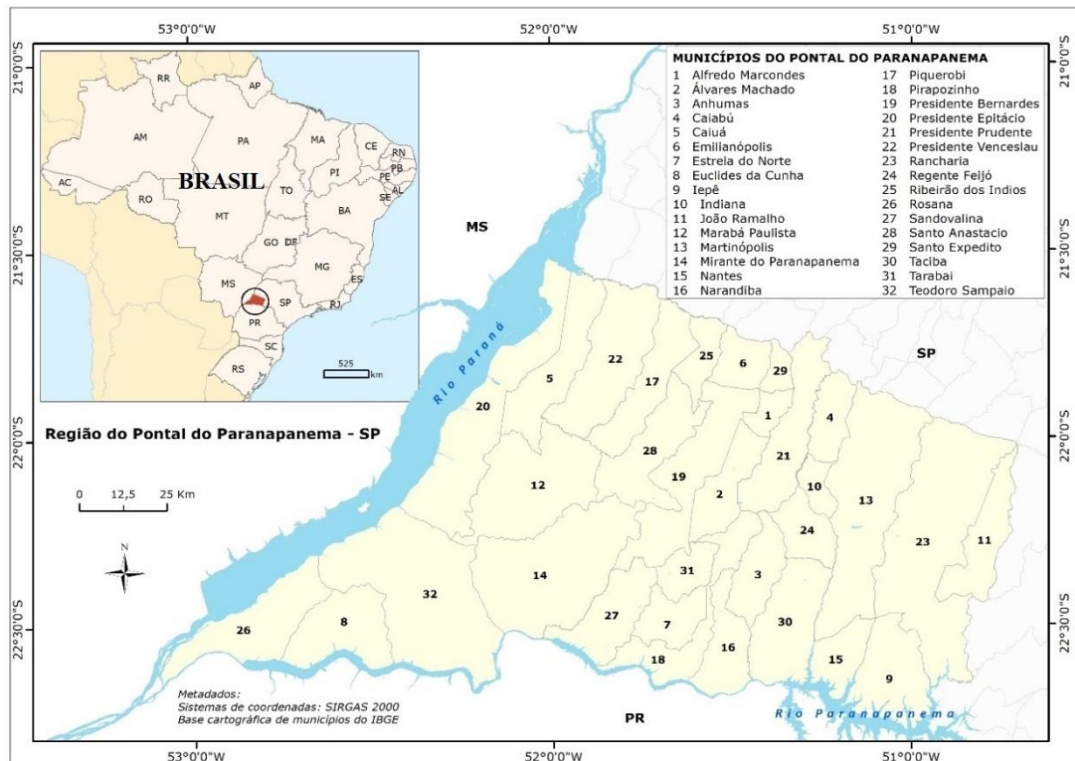
acurácia altimétrica de variados MDS gratuitos para toda a região do Pontal do Paranapanema, considerando um denso conjunto de pontos de verificação provenientes da integração dos bancos de dados SIGEF e da Fundação Instituto de Terras do Estado de São Paulo (ITESP). Além de consistir em uma complementação ao trabalho de Machado et al. (2019), este trabalho traz como principal contribuição disponibilizar uma metodologia que oriente o uso de bancos de dados geográficos gratuitos, como referencial altimétrico, na caracterização da confiabilidade geométrica de modelos digitais de superfícies requeridos no desenvolvimento de trabalhos em diversas áreas.

## MATERIAL E MÉTODO

### ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no oeste do estado de São Paulo, com extensão territorial aproximada de 20.000 km<sup>2</sup>, composta por 32 municípios (Figura 1) e denominada de Pontal do Paranapanema. Segundo Torres e Silva Junior (2010), o Pontal possui relevo uniforme, com predominância de colinas amplas e médias. A altitude dessa região varia aproximadamente de 240 m a 630 m.

Figura 1 - Área de estudo: Pontal do Paranapanema.



Fonte: elaborado pelos autores.

Historicamente, a região do Pontal do Paranapanema é marcada por muitos conflitos entre movimentos de trabalhadores rurais sem terra e grandes latifundiários, o que demandou muitos trabalhos de intervenção do Estado pela Fundação ITESP. Por consequência, a região possui a maior concentração de assentamentos rurais do estado de São Paulo.

### BANCO DE DADOS GEOGRÁFICO

Um total de quatro MDS gratuitos teve sua acurácia altimétrica validada nesse trabalho. Cada modelo foi adquirido em datas distintas e possuem resoluções espaciais e métodos de aquisição diferentes (Tabela 2).



Tabela 2 - Características dos MDS estudados.

| MDS             | Período de aquisição das imagens | Resolução espacial | Nº de Imagens utilizadas | Método de aquisição |
|-----------------|----------------------------------|--------------------|--------------------------|---------------------|
| MDS v3 SRTM     | 02/2000                          | 30 metros          | 7                        | RADAR               |
| Bare-Earth SRTM | 02/2000                          | 90 metros          | 1                        | RADAR               |
| ASTER GDEM2     | 10/2011                          | 30 metros          | 7                        | Ortoimagens         |
| ALOS-Palsar     | 05/2006 a 04/2011                | 12,5 metros        | 13                       | RADAR               |

Fonte: elaborado pelos autores.

As imagens referentes ao MDS v3 do SRTM e ASTER GDEM2, necessárias para recobrir a área de estudo, foram obtidas na plataforma *Earth Explorer* do *United States Geological Survey* (USGS) (USGS, 2019). A imagem do MDS referente ao Bare-Earth SRTM foi obtida na página da Universidade de Bistol, Reino Unido (PAIVA e O'LOUGHLIN, 2019). As imagens do MDS do ALOS-Palsar foram obtidas na página *Alaska Satellite Facility* (ASF, 2019).

A referência altimétrica utilizada neste trabalho para a validação dos MDS é composta por duas fontes de dados distintas: SIGEF e ITESP. O conjunto de pontos de verificação (E,N,H) certificados pelo SIGEF totaliza 28.342 pontos para a área de estudo, e esses dados estão disponibilizados no site de Certificação de Imóveis Rurais do INCRA. O conjunto de pontos de verificação proveniente da Fundação ITESP é formado por 6.015 pontos para a área de interesse e foi cedido pelo próprio instituto.

### PROCESSAMENTO DOS DADOS

Assim como em Machado et al. (2019), utilizou-se o *software* livre QGIS 2.18 (QGIS, 2019) para a compatibilização de datum (referencial) dos MDS de interesse com o datum dos pontos do banco do SIGEF e da Fundação ITESP. Adotou-se o datum oficial do Brasil, o SIRGAS2000, e a projeção UTM (Universal Transversa de Mercator), fuso 22 Sul.

O processamento dos dados foi iniciado pela remoção de possíveis depressões dos MDS. Neste caso, utilizou-se a ferramenta TauDEM 5.2 no QGIS 2.18. No raster, essas depressões consistem em células de pontos mais baixos, normalmente cercados por um relevo elevado. Conforme Cardoso et al. (2016), com a remoção dessas inconsistências, tem-se um MDS hidrologicamente consistente o que é importante para a extração de produtos desses dados.

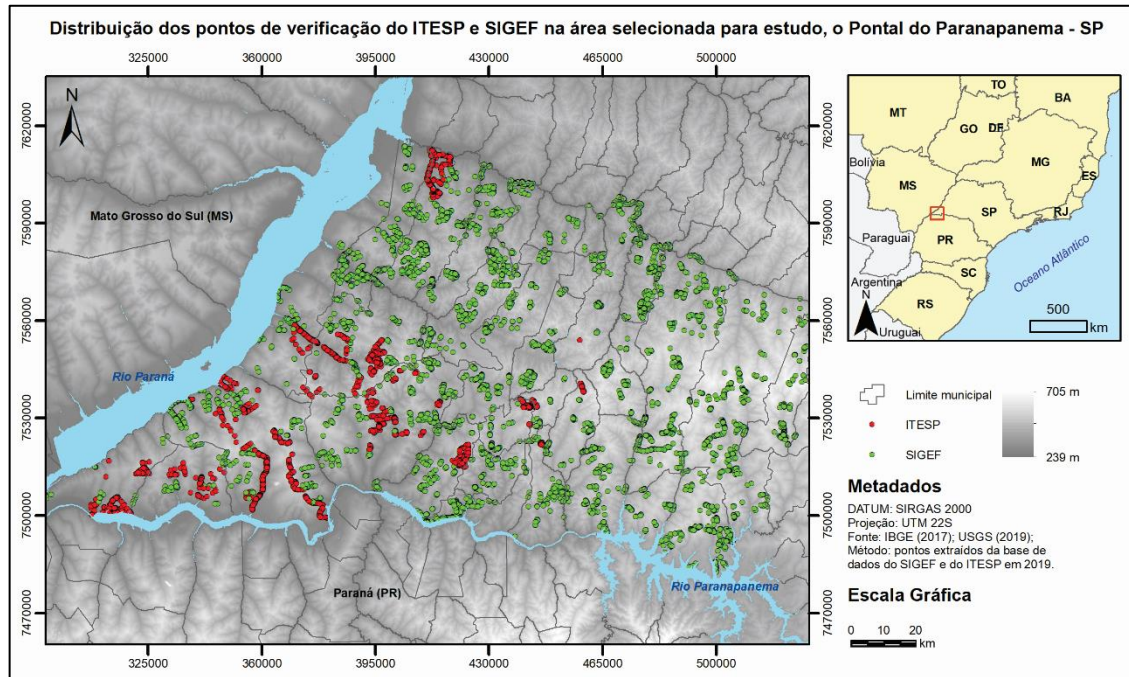
No banco de dados do SIGEF, seguindo a abordagem proposta por Machado et al. (2019), aplicou-se quatro filtragens, visando a eliminação de possíveis erros grosseiros. As filtragens consistiram em (MACHADO et al., 2019):

1. Seleção de pontos apenas do tipo M (Marco, isto é, levantados de forma direta e materializados no terreno) e do tipo P (Ponto, isto é, levantados de forma direta e não materializados no terreno). Há no banco de dados do SIGEF pontos de outros tipos, como tipo V (Virtual), que é determinado de forma indireta, ou seja, por meio de projeções, offsets, aerofotogrametria, sistemas de Radar, sensores orbitais, etc.;
2. Seleção de pontos levantados com receptores GNSS (*Global Navigation Satellite System*) e métodos de posicionamento relativo estático (PG1) ou relativo estático-rápido (PG2);
3. Seleção de pontos com desvio-padrão nas coordenadas E, N e H menor que 01 (um) metro. Essa decisão visa utilizar pontos levantados com alta acurácia e;
4. Remoção de pontos duplicados. Os dados do SIGEF são disponibilizados por propriedade rural, e ao se realizar *download* de pontos de propriedades vizinhas acabam-se repetindo duas ou mais vezes os pontos de confrontação dessas propriedades.

Os três primeiros filtros foram aplicados para selecionar os pontos de verificação no banco de dados da Fundação ITESP. Para a área de interesse (Figura 2), as filtragens resultaram em um conjunto amostral de 9.689 pontos no banco do SIGEF, e 5.487 pontos no banco da Fundação ITESP, totalizando uma amostra de 15.176 pontos. O banco de dados inicial, com 34.357 pontos (ITESP e SIGEF), foi reduzido em aproximadamente 44% após o processo de filtragem dos dados. Isso confirma a afirmativa de Machado et al. (2019) de se analisar a confiabilidade geométrica do conjunto de pontos de verificação antes de assumi-los como referência para a validação de MDS.

A altitude de cada um dos 15.176 pontos (Figura 2) foi extraída dos MDS nos pixels correspondentes de modo automático utilizando o complemento *Point Sampling Tool* do *software* QGIS 2.18. Esse procedimento resulta em um arquivo vetorial de pontos contendo as coordenadas (E,N) de cada ponto de verificação e o valor de DN (*Digital Number*) que é a altitude correspondente ao ponto no MDS.

Figura 2 - Distribuição dos pontos de verificação na área em estudo.



Fonte: elaborado pelos autores.

Os MDS estudados disponibilizam a coordenada vertical em altitude ortométrica (H) e referenciada ao datum EGM96 ( $H_{EGM96}$ ). Entretanto, nos pontos de verificação a coordenada vertical é disponibilizada em altitude geométrica (h), referenciada ao datum SIRGAS 2000. Para converter a altitude geométrica em ortométrica, referenciada ao EGM96, utilizou-se o *software* livre Vdatum do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) (NOAA, 2019).

Antes de iniciar o processo de validação da acurácia altimétrica dos MDS foi realizada uma análise exploratória dos dados, conforme recomenda Machado et al. (2019), com o intuito de identificar a existência de *outliers* no conjunto de dados. Essa análise consistiu no cálculo de valores de Média, Mínimo, Máximo, Quartil e Desvio Padrão das discrepâncias ( $H_{MDS} - H_{ponto\_verificação}$ ), além da construção de gráficos *Boxplot*, isto para cada MDS a ser validado.

Posteriormente, com base nos valores encontrados foram definidos três limiares de exclusão para analisar a influência da remoção dos *outliers* do conjunto amostral. Isso porquê os valores de limites superior e inferior dos gráficos *Boxplot* variaram em função do MDS analisados, tornando difícil definir um valor comum para ser considerado como *outlier* em todos os MDS.

### **VALIDAÇÃO DA ACURÁCIA ALTIMÉTRICA DOS MODELOS DIGITAIS DE SUPERFÍCIE**

A validação da componente altimétrica dos MDS foi realizada pela aplicação do Padrão de Exatidão Cartográfica dos Produtos Cartográficos Digitais (PEC-PCD), como mostra a Tabela 3 (CONCAR, 2011). Essa abordagem de validação é tradicional (LOUSADA e FERNANDES, 2017; MARINI et al., 2017; PEREIRA et al., 2019; MACHADO et al., 2019) e recomendada no Brasil pela Comissão Nacional de Cartografia (RAMOS et al., 2016).

Tabela 3 - Padrão de Exatidão Cartográfica Altimétrica dos Pontos Cotados e do MDT, MDE e MDS para a produção de Produtos Cartográficos Digitais.

| PEC-PCD  | Escala 1:25.000 |       | Escala 1:50.000 |       | Escala 1:100.000 |       |
|----------|-----------------|-------|-----------------|-------|------------------|-------|
|          | PEC (m)         | EP(m) | PEC (m)         | EP(m) | PEC (m)          | EP(m) |
| Classe A | 2,70            | 1,67  | 5,50            | 3,33  | 13,70            | 8,33  |
| Classe B | 5,00            | 3,33  | 10,00           | 6,66  | 25,00            | 16,66 |
| Classe C | 6,00            | 4,00  | 12,00           | 8,00  | 30,00            | 20,00 |
| Classe D | 7,50            | 5,00  | 15,00           | 10,00 | 37,50            | 25,00 |

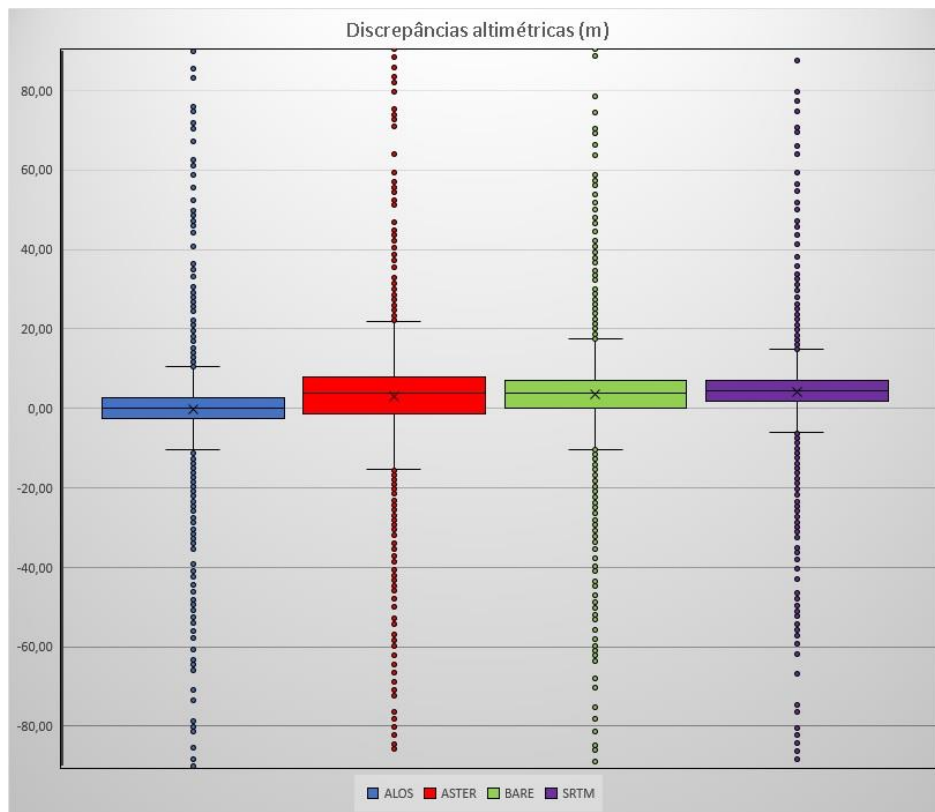
Fonte: CONCAR (2011) modificado pelos autores.

A validação é realizada com base nos valores tabelados de PEC e EP, conforme a escala de mapeamento analisada. Para que um MDS possa ser classificado como Classe A na escala 1:50.000, o RMSE (*Root Mean Square Error*) deve ser menor que o Erro Padrão (EP) de 3,3 m. Além disso, mais de 90% dos pontos de verificação devem possuir discrepância altimétrica ( $H_{MDS} - H_{ponto\_verificação}$ ) menor que o Padrão de Exatidão Cartográfica de 5,50 m. O processo de validação de cada MDS usando o PEC-PCD foi realizado individualmente.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3 mostra as discrepâncias altimétricas para cada MDS validado. Essa representação gráfica, juntamente com os resultados da análise exploratória (Tabela 4), possibilitam a identificação de *outliers* no conjunto amostral de 15.176 pontos.

Figura 3 - Discrepâncias altimétricas para cada MDS.



Fonte: elaborado pelos autores.

Na Figura 3, não é possível identificar a simetria dos conjuntos das discrepâncias observando-se cada *Boxplot*, com a exceção do MDS do ASTER onde a mediana demonstra leve deslocamento do centro do *Boxplot* em direção ao valor do 3º quartil, indicando assimetria negativa. Contudo a simetria bem como a amplitude dos conjuntos de discrepâncias são melhor percebidas nos valores presentes na tabela 4. Observa-se também, que para todos os MDS validados há discrepâncias altimétricas acima de  $\pm 85$  m, das quais conduzem a duas interpretações possíveis. A primeira é que os valores dessas discrepâncias são referentes a diferentes pontos de verificação em cada MDS, indicando que esses erros ocorrem devido ao modelo e não ao banco de dados de 15.176 pontos (SIGEF e ITESP). A segunda interpretação é que os valores dessas discrepâncias ocorrem nos mesmos pontos de verificação, sendo um indicativo de que existe algum problema com o banco de dados em uso, como por exemplo a existência de erros grosseiros mesmo após a filtragem realizadas nos pontos.

Para tanto, adotou-se como *outlier* o valor da discrepância no ponto de verificação 'i' acima de um limiar definido para os MDS de interesse. Se a discrepância no ponto de verificação 'i' foi maior que o limiar em apenas um dos MDS, assumiu-se então o problema ocorreu na acurácia do modelo, e que esse ponto seria mantido no banco de dados para não enviesar o processo de validação. A identificação dos possíveis *outliers* foi realizada usando os limites superior e inferior do gráfico (Figura 3).

Nos MDS analisados (Tabela 4), a média das discrepâncias altimétricas apresentou abaixo da mediana, indicando uma distribuição assimétrica negativa do conjunto amostral. Ou seja, há maior concentração das discrepâncias acima do valor da média do conjunto. Pelos valores de mínimo e máximo, verifica-se que a maior amplitude nas discrepâncias ocorreu para os dados do MDS do ASTER GDEM2 (Tabela 4), indicando possivelmente uma piora na acurácia vertical desse modelo. Ademais, nota-se que a média das discrepâncias obtida para o MDS ALOS-Palsar tende a zero (média = -0,17 m), resultando em um menor desvio-padrão e indicando maior precisão.

Tabela 4 - Análise estatística dos valores de discrepâncias obtidos para cada MDS.

| Estatística das discrepâncias (m) | ALOS-Palsar | ASTER GDEM2 | Bare-Earth SRTM | MDS v3 SRTM |
|-----------------------------------|-------------|-------------|-----------------|-------------|
| Média                             | -0,17       | 3,01        | 3,43            | 4,24        |
| RMSE                              | 9,11        | 10,97       | 10,44           | 10,06       |
| Desvio-Padrão                     | 9,11        | 10,54       | 9,86            | 9,13        |
| Valor mínimo                      | -275,01     | -273,01     | -272,77         | -270,01     |
| Valor máximo                      | 129,65      | 135,18      | 131,03          | 131,65      |
| 1º quartil (Q1)                   | -2,51       | -1,32       | 0,10            | 1,84        |
| 2º quartil (mediana)              | 0,11        | 3,84        | 3,92            | 4,55        |
| 3º quartil (Q3)                   | 2,68        | 8,00        | 7,08            | 7,06        |
| Limite superior do <i>BoxPlot</i> | 10,47       | 21,98       | 17,55           | 14,89       |
| Limite inferior do <i>BoxPlot</i> | -10,30      | -15,30      | -10,37          | -5,99       |

Fonte: elaborado pelos autores.

Os valores de limites superior e inferior do gráfico (Figura 4) variaram em função do MDS em análise. Isso torna difícil definir um valor comum para ser considerado como *outlier* em todos os modelos. Assim, optou-se por trabalhar com os limiares  $\pm 20$ m,  $\pm 15$ m e  $\pm 10$ m para analisar o comportamento dos dados na remoção dos *outliers* de acordo com cada limite definido. A Tabela 5 mostra as estatísticas descritivas com os valores de RMSE, média, mediana e desvio-padrão das discrepâncias altimétricas obtidas com a exclusão dos *outliers* para cada limiar pré-definido. Para os três limiares de filtragem



dos dados, o MDS do ALOS-Palsar apresentou os melhores resultados em termos de valor de RMSE, chegando a 4,36 m na filtragem dos pontos com discrepância altimétrica entre  $\pm 10$  metros.

Tabela 5 - Estatísticas descritivas para o banco de dados após remoção de outliers de cada limiar.

| Limiares  | Estatística       | ALOS-Palsar | ASTER GDEM2 | Bare-Earth | MDS v3 SRTM |
|---|-------------------|-------------|-------------|------------|-------------|
| $\pm 20$ m.<br>Total de 198 pontos excluídos do banco de dados. | RMSE (m)          | 4,74        | 8,03        | 7,12       | 6,53        |
|   | Média (m)         | 0,03        | 3,19        | 3,63       | 4,44        |
|   | Mediana (m)       | 0,13        | 3,87        | 3,94       | 4,56        |
|   | Desvio-padrão (m) | 4,74        | 7,37        | 6,12       | 4,79        |
| $\pm 15$ m. Total de 254 pontos excluídos do banco de dados.    | RMSE (m)          | 4,54        | 7,93        | 6,99       | 6,41        |
|   | Média (m)         | 0,05        | 3,22        | 3,65       | 4,46        |
|   | Mediana (m)       | 0,13        | 3,88        | 3,94       | 4,57        |
|   | Desvio-padrão (m) | 4,54        | 7,24        | 5,96       | 4,60        |
| $\pm 10$ m. Total de 409 pontos excluídos do banco de dados.    | RMSE (m)          | 4,36        | 7,77        | 6,81       | 6,21        |
|   | Média (m)         | -0,02       | 3,14        | 3,58       | 4,39        |
|   | Mediana (m)       | 0,10        | 3,82        | 3,91       | 4,53        |
|   | Desvio-padrão (m) | 4,35        | 7,11        | 5,79       | 4,40        |

Fonte: elaborado pelos autores.

Ao comparar os resultados da Tabela 5 com a Tabela 3, constatou-se que os dados do MDS do ALOS-Palsar e do MDS v3 do SRTM atingem valor de RMSE abaixo de 6,6m, valor máximo tabelado para o EP (Tabela 3) da Classe B, escala 1:50.000. O modelo com pior resultado em relação ao valor do RMSE (8,03 m) é o MDS do ASTER GDEM2, quando se adotou o limiar para a faixa de exclusão de  $\pm 20$ m para a remoção de *outliers*. A remoção de um dado espúrio da amostra afeta muito o valor da média e pouco o valor da mediana (VOLPATO e BARRETO, 2016), caso que pode ser comprovado ao se observar os valores de média e medianas das discrepâncias altimétricas antes (Tabela 3) e após (Tabela 4) a remoção dos *outliers* com base em cada limiar ( $\pm 10$ m,  $\pm 15$ m e  $\pm 20$ m).

Foi determinado (Tabela 6), para cada MDS, as porcentagens de pontos de verificação com discrepâncias altimétricas inferiores ao valor do PEC-PCD (Tabela 3) nas classes de A até D, escala 1:50.000, e na classe A, escala 1:100.000. O MDS ALOS-Palsar tem mais de 90% das discrepâncias altimétricas abaixo do valor tabelado para a classe B, escala 1:50.000, independentemente do limiar pré-definido. O segundo modelo de melhor desempenho foi o MDS v3 SRTM, pois em todas as análises para a classe B, escala 1:50.000, aproximadamente 90% das discrepâncias altimétricas nos pontos de verificação foram abaixo do valor de referência do PEC-PECD (Tabela 3).

O modelo ASTER GDEM2 apresentou os piores resultados para a área estudada (Tabela 6). O MDS do Bare-Earth SRTM obteve porcentagens próximas daquelas do MDS v3 do SRTM, o que era esperado, tendo em vista que o Bare-Earth é um resultado de um reprocessamento e reamostragem dos dados do MDS v1 do SRTM.

Tabela 6 - Porcentagem de pontos que apresentam discrepâncias altimétricas inferiores ao valor do PEC-PCD em função da escala da carta para cada MDS em análise.

| Limiares | MDS             | Escala 1/50.000 |          |          |          | Escala 1/100.000 |
|----------|-----------------|-----------------|----------|----------|----------|------------------|
|          |                 | Classe A        | Classe B | Classe C | Classe D | Classe A         |
| ±20m     | ALOS-Palsar     | 80,97%          | 95,09%   | 97,57%   | 99,11%   | 98,66%           |
|          | ASTER GDEM2     | 47,96%          | 79,82%   | 87,64%   | 94,67%   | 92,42%           |
|          | Bare-Earth SRTM | 57,03%          | 86,20%   | 91,88%   | 96,21%   | 94,69%           |
|          | MDS v3 SRTM     | 57,43%          | 89,24%   | 94,67%   | 97,82%   | 96,79%           |
| ±15m     | ALOS-Palsar     | 81,27%          | 95,46%   | 97,92%   | 99,48%   | 99,03%           |
|          | ASTER GMDE2     | 48,14%          | 80,12%   | 87,97%   | 95,02%   | 92,76%           |
|          | Bare-Earth SRTM | 57,24%          | 86,52%   | 92,23%   | 96,58%   | 95,04%           |
|          | MDS v3 SRTM     | 57,65%          | 89,58%   | 95,03%   | 98,18%   | 97,15%           |
| ±10m     | ALOS-Palsar     | 82,12%          | 96,45%   | 98,42%   | 99,69%   | 99,32%           |
|          | ASTER GMDE2     | 48,62%          | 80,90%   | 88,66%   | 95,53%   | 93,36%           |
|          | Bare-Earth SRTM | 57,82%          | 87,38%   | 93,03%   | 97,18%   | 95,74%           |
|          | MDS v3 SRTM     | 58,25%          | 90,51%   | 95,92%   | 98,96%   | 98,02%           |

Fonte: elaborado pelos autores.

Segundo o conceito de PEC-PCD, ambos os valores PEC e EP são verificados em conjunto, ou seja, 90% das discrepâncias devem ser menores que o PEC e o RMSE deve ser menor que o EP (Tabela 3). Sendo assim, apresenta-se na Tabela 7 o resultado da validação de cada MDS, segundo o conceito de PEC-PCD.

Tabela 7 - Validação dos MDS para cada faixa de exclusão.

| Limiares | ALOS-Palsar | ASTER GDEM2 | Bare-Earth SRTM | MDS v3 SRTM |
|----------|-------------|-------------|-----------------|-------------|
| ±10m     | Classe B    | Classe A    | Classe C        | Classe B    |
|          | 1 / 50.000  | 1 / 100.000 | 1 / 50.000      | 1 / 50.000  |
| ±15m     | Classe B    | Classe A    | Classe C        | Classe C    |
|          | 1 / 50.000  | 1 / 100.000 | 1 / 50.000      | 1 / 50.000  |
| ±20m     | Classe B    | Classe A    | Classe C        | Classe C    |
|          | 1 / 50.000  | 1 / 100.000 | 1 / 50.000      | 1 / 50.000  |

Fonte: elaborado pelos autores.

Para a área em estudo, constatou-se que o MDS de maior acurácia altimétrica é o modelo obtido pelo ALOS-Palsar, sendo um MDS indicado para trabalhos na escala 1:50.000, classe B PEC-PCD. Ao passo que os dados provenientes do ASTER GDEM2 são indicados para trabalhos na escala 1:100.000, classe A, independentemente da filtragem (limiar) aplicada nos pontos de verificação para a remoção de *outliers* (Tabela 7).

Os modelos Bare-Earth SRTM e MDS v3 SRTM apresentam resultados similares (Tabela 7) quando aplicados os limiares de ±10m, ±15m ou ±20m, obtendo a classificação classe C, escala 1:50.000. Uma exceção foi na aplicação do limiar de ±10m, na qual o MDS v3 SRTM passou a ser classificado na classe B, escala 1:50.000.

O estudo de Mukul et al. (2017) afirma a existência de *outliers* nos dados do SRTM. Todavia, para nosso estudo de caso, a filtragem dos *outliers* no modelo v3 SRTM fez com que esse modelo, de 30 m

de resolução espacial, alcançasse a mesma classificação que a do MDS ALOS-Palsar com resolução espacial de 12,5m. Marini et al. (2017) realizaram a validação de diferentes MDS para todo o estado do Mato Grosso do Sul, e concluíram que o MDS v3 SRTM é o modelo de melhor acurácia altimétrica para aquela região, visto que mais de 90% dos pontos analisados têm discrepância inferior a 5,5 m e RMSE menor que 3,33 m, resultado em classe A, na escala 1:50.000. No entanto, esse resultado superior ao modelo ALOS-Palsar pode ser atribuído ao número reduzido de pontos de verificação utilizados no estudo (total de 122 pontos). Um banco de dados geográfico “denso”, com pontos de verificação apresentando alta acurácia, torna mais criterioso o processo de validação geométrica dos modelos digitais de superfície.

## CONCLUSÕES

A literatura apresenta trabalhos que realizam o controle de qualidade de modelos digitais de superfície, a partir de um conjunto de pontos admitidos como referencial altimétrico. Todavia, constata-se que a dimensão do conjunto amostral usado é variável e, que muitas das vezes, é pequena para a área de interesse, o que pode resultar em uma distribuição não homogênea ou pouco representativa da área. Nosso estudo de caso demonstra que um banco de dados “denso”, contendo pontos de alta acurácia, torna mais criteriosa o processo de validação altimétrica de MDS gratuitos disponíveis em diferentes resoluções espaciais.

Constatou-se que o banco de dados geográfico do SIGEF, disponível para todo o Brasil, assim como o banco de dados do ITESP, para algumas regiões do estado de São Paulo, são fontes de dados importantes e que podem ser usadas para adensar o conjunto de marcos geodésicos do IBGE no território nacional, minimizando o levantamento de pontos de verificação em campo. Vale ressaltar que não foram utilizados marcos do IBGE como pontos de verificação pois, para a área em estudo, há somente 12 pontos disponíveis. Notou-se também que a localização desses pontos é próxima aos do ITESP. No entanto, observou-se que ambos bancos de dados, SIGEF e ITESP, requerem processos de filtragem para garantir confiabilidade na acurácia dos pontos.

Nosso trabalho mostrou que para a região do Pontal do Paranapanema, localizada no oeste do estado de São Paulo, o MDS mais acurado é o MDS ALOS-Palsar, de 12,5 m de resolução espacial. Porém, o MDS v3 SRTM, embora com menor resolução espacial (30 m), também é uma fonte de dados com alta confiabilidade geométrica (componente vertical). Esses modelos são indicados para o desenvolvimento de trabalhos na escala de mapeamento de 1:50.000, sendo o erro padrão associado de 6,6 m. Sugere-se o emprego desta abordagem na validação de MDS para outras regiões do país. Isso permitirá apontar o modelo de maior acurácia altimétrica que pode ser empregado na extração de produtos cartográficos.

## AGRADECIMENTOS

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de mestrado do primeiro autor e à Fundação ITESP pelo fornecimento dos dados.

## REFERÊNCIAS

ASF. Alaska Satellite Facility - Data Search Vertex. Disponível em: < <https://search.asf.alaska.edu/#/>>. Acesso em: 12 set. 2019.

CARDOSO, F. A. C.; DE PAULA, D. L. P.; MOR, C. A. M.; MAIA, J. L.; VIEIRA, E. M. Modelo digital de elevação hidrologicamente consistente para a bacia do rio Doce: elaboração e análise. Revista Brasileira de Geografia Física, Recife - PE, V.09, N.06, 1978-1989, 2016. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v9.6.p1978-1989>

CONCAR. Comissão Nacional de Cartografia. Especificação Técnica Para a Aquisição de Dados Geoespaciais Vetoriais (ET-ADGV) Versão 2.5. Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais, Brasil, 2ed, 2011.

CORREA, N. F.; RIBEIRO, V. O.; MIOTO, C. L.; FILHO, A. C. P. Obtenção de MDE Corrigido para Delimitação de Bacia Hidrográfica com Auxílio de Geotecnologias Livres. Anuário do Instituto de Geociências, Rio de Janeiro - RJ, v. 40-1, 217-225, 2017. [https://doi.org/10.11137/2017\\_1\\_217\\_225](https://doi.org/10.11137/2017_1_217_225)

CUNHA, H. N.; ALBA, J. M. F.; MIURA, A. K.; SALDANHA, D. L. Análise da Suscetibilidade à Erosão da Bacia Hidrográfica do Alto Camaquã (RS). Revista Caminhos de Geografia, Uberlândia - MG, v. 19, n. 65, 16-28, 2018. <https://doi.org/10.14393/RCG196502>

ITESP. Fundação Instituto de Terras do Estado de São Paulo - "José Gomes da Silva". Quem somos. Disponível em: <<http://201.55.33.20/>>. Acesso em: 12 set. 2019.

LOUSADA, G.; FERNANDES, M. C. 2017. Avaliação da Precisão Vertical de Modelos Digitais de Elevação e Análise de Tendências em Diferentes Domínios Geomorfológicos. Revista Brasileira de Cartografia, Uberlândia - MG, N° 69/7, p. 1263-1276, 2017.

MACHADO, V. S.; MARCATO JR., J.; SOUZA, M. K. G.; OSCO, L. P.; RAMOS, A. P. M. Validação da Acurácia Vertical de Modelos Digitais de Superfície Utilizando o Banco de Dados do Sistema de Gestão Fundiária: Um Estudo de Caso no Oeste do Estado de São Paulo. Anuário do Instituto de Geociências, Rio de Janeiro - RJ, v 42-4, 139-147, 2019.. [https://doi.org/10.11137/2019\\_4\\_139\\_147](https://doi.org/10.11137/2019_4_139_147)

MARINI, L. B.; MARCATO Jr., J.; RAMOS, A. P. M.; FILHO, A. C. P.; BARROS, W. M.; HIGA, L. T. Análise da Acurácia Altimétrica dos Modelos Digitais de Superfície SRTM, ASTER e Topodata e Aplicação na Representação 3D do Pantanal da Nhecolândia. Anuário do Instituto de Geociências, Rio de Janeiro - RJ, v. 40-3, 48-54, 2017. [https://doi.org/10.11137/2017\\_3\\_48\\_54](https://doi.org/10.11137/2017_3_48_54)

MOURA, L. C.; MARQUES, A. F. S. M. Modelagem e Mapeamento de Solos do Município Mineiro de Machado Utilizando-se de Geoprocessamento. Revista Caminhos de Geografia, Uberlândia - MG, v. 9, n. 25, 195-202, 2008.

MOURA, L. Z.; BIAS, E. De S.; BRITES, R. S. Avaliação da Acurácia Vertical de Modelos Digitais de Elevação (MDS) nas Bacias do Paranoá e São Bartolomeu. Revista Brasileira de Cartografia, Uberlândia - MG, v. 1, n. 66, 2014.

MUKUL, M.; SRIVASTAVA, V.; JADE, S. & MUKUL, M. Uncertainties in the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Heights: Insights from the Indian Himalaya and Peninsula, Scientific Reports - 7:41672 2017. <https://doi.org/10.1038/srep41672>

NOAA. National Oceanic And Atmospheric Administration - Vertical Datum Transformation. Disponível em: <<https://vdatum.noaa.gov/welcome.html>>. Acesso em 12 set. 2019.

O'LOUGHLIN, F. E.; PAIVA, R. C. D.; DURAND, M.; ALSDORF, D. E.; BATES, P. D. A. Multi-Sensor Approach Towards a Global Vegetation Corrected SRTM DEM Product. Remote Sensing of Environment, V. 182, P. 49-59, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.04.018>

PAIVA, R.; O'LOUGHLIN, F. Bare-Earth SRTM. Disponível em: <<https://doi.org/10.5523/bris.10tv0p32gizt01nh9edcjd6wa>>. Acesso em 12 set. 2019.

PATEL, A.; KATIYAR, S. K.; PRASAD, V. Performances Evaluation of Different Open Source DEM Using Differential Global Positioning System (DGPS). The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences, v. 19, 7-16, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2015.12.004>

PEREIRA, H. L.; CATALUNHA, M. J.; JUNIOR, C. R. B.; SOUSA, P. T. G. Qualidade de Modelos Digitais de Elevação Utilizando Dados do SIGEF: Estudo de Caso para as Sub-Bacias do Ribeirão dos Mangues e Rio Soninho no Estado do Tocantins. Revista Brasileira de Geografia Física, Recife - PE, V.12, N.01, 187-200, 2019. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.1.p187-200>

PINTO, M. S.; AMORIM, A. Ortoretificação de Imagem Quickbird com Diferentes Modelos Digitais de Terreno: Análise da Qualidade Geométrica. Revista Brasileira de Geografia Física, Recife - PE, v. 63, 2011.



QGIS. QGIS Geographic Information System. Versão 2.18. Disponível em <<http://qgis.osgeo.org>>. Acesso em: 12 set. 2019.

RAMOS, A. P. M.; CAMPOS, M. B.; PROL, F. S.; MARCATO JR., J. ; IVANOVA, I. Abordagem Sistemática Para A Especificação Da Qualidade De Base Cartográfica Nos Padrões Para Os Dados Da Infraestrutura Nacional De Dados Espaciais. Revista Brasileira de Cartografia, Uberlândia - MG, n. 68, 1601-1620, 2016.

SANTILLAN, J. R.; MAKINANO-SANTILLAN, M. Vertical Accuracy Assessment of 30-M Resolution ALOS, ASTER and SRTM Global DEMS Over Northeastern Mindanao, Philippines. In: The International Archives of The Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume Xli-B4, Xxiii Isprs Congress, Prague, Czech Republic, 2016. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B4-149-2016>

SIGEF. Sistema de Gestão Fundiária. Apresentação. Disponível em: <<https://sigef.incra.gov.br/>>. Acesso em: 12 de set. 2019.

SPANGHERO, P. E. S. F.; MELIANI, P. F.; MENDES, J. S. Mapeamento Hidrográfico de Detalhe e Análise Morfométrica Comparativa das Bacias dos Rios Tijuípe e Tijuipinho, Litoral Sul da Bahia. Revista Caminhos de Geografia, Uberlândia - MG, v. 16, n. 53, 101-117, 2015.

TORRES, E. C.; SILVA JUNIOR., F. Pontal do Paranapanema: Um Olhar por Meio de Trabalho de Campo. Geografia, Londrina, v. 19 n. 1, 165-179, 2010.

USGS. United States Geological Survey - Earth Explorer. Disponível em:<<https://earthexplorer.usgs.gov>>. Acesso em: 12 set. 2019.

VOLPATO, G.; BARRETO, R. Estatística Sem Dor!!! Botucatu, Best Writing, 2 ed., 160p, 2016.

---

Recebido em: 21/10/2019

Aceito para publicação em: 08/05/2020